

**EVALUACION DE RECUBRIMIENTOS COMERCIALES  
PARA APLICARLOS EN TUBERIA**

**JHON FREDY AVILA PIRACOCA**



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALURGIA  
TUNJA  
2018**

**EVALUACION DE RECUBRIMIENTOS COMERCIALES  
PARA APLICARLOS EN TUBERIA**

**JHON FREDY AVILA PIRACOCA**

**Trabajo de grado para optar al título de  
INGENIERO METALURGICO**

**DIRECTOR  
PhD. ENRIQUE VERA LÓPEZ**

**CODIRECTOR  
ING. OSCAR GOMEZ**



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALURGIA  
TUNJA  
2018**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Tunja, 25 mayo de 2018

La autoridad científica de la facultad de ingeniería reside en ella misma, por tanto no responde por las opiniones expresadas en este proyecto de investigación

Se autoriza su uso y reproducción indicando su origen

## **DEDICATORIAS**

Gracias a Dios y a la Virgen Del Carmen por bendecirme en cada paso que doy.

Quiero compartir la alegría con estas personas que estuvieron listas a apoyar y dar una voz de aliento en el transcurso de esta etapa.

A mis padres Fulvio Avila y Carmen Piracoca, por estar dispuestos a brindar su apoyo, respaldo y demostrar que todo es posible si se hace con dedicación y esfuerzo.

A mis hermanas Yeimy Arias Y Elida Avila, por su apoyo incondicional, alegrías y palabras de aliento en mejorar cada día.

A mi abuelita Ana Hilda Avila y tia Lyda Avila por expresar confianza y esperanza con sus oraciones en vencer momentos difíciles.

A mis amigos Joaquín García, Jorge Pérez y Luis Avila por sus enseñanzas de compañerismo y apoyo en el aprendizaje y superación de la carrera.

A Angie Ruiz por el apoyo en esta etapa y afrontar momentos alegres y tristes

**JHON FREDY AVILA PIRACOCA**

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa su agradecimiento a:

A Dios por habernos permitido cumplir un sueño más, por ser mi guía y por darme la fortaleza intelectual y espiritual para poder superar todos los obstáculos que se presentaron durante el desarrollo de mi carrera.

A mi director el PhD Enrique Vera López por haber confiado en mis capacidades para lograr el desarrollo del proyecto de investigación y en ser guía con sus conocimientos.

Al ingeniero Oscar Gómez y Mauricio Muñoz por su conocimiento y colaboración en la realización de los ensayos de laboratorio y por animo durante la ejecución del proyecto de investigación.

A quienes integran al instituto para la Investigación y la Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales INCITEMA, por su colaboración.

Finalmente agradezco a cada una de las personas que compartieron en mi paso por la universidad, en el desarrollo del trabajo de investigación a los administrativos, compañeros, amigos y que de alguna u otra manera me apoyaron he hicieron posible este logro.

JHON FREDY AVILA PIRACOCA

## TABLA DE CONTENIDO

	PAG
RESUMEN .....	13
ABSTRACT .....	14
INTRODUCCIÓN .....	15
OBJETIVOS .....	16
 GENERAL .....	16
ESPECÍFICOS .....	16
 1. MARCO CONCEPTUAL .....	17
1.1 DEFINICION DE RECUBRIMIENTO: .....	17
1.2 CORROSION EN TUBERIA .....	18
1.3 MECANISMOS GENERALES DE PROTECCIÓN DE LAS PELÍCULAS DE RECUBRIMIENTOS .....	19
1.3.1 Barrera impermeable .....	20
1.3.2 Pasivación.....	20
1.3.3 Protección catódica.....	20
1.4 RECUBRIMIENTOS COMO ÁNODO DE SACRIFICIO .....	23
1.4.1 Recubrimiento y protección catódica. ....	24
1.5 CORRIENTE IMPRESA.....	24
1.5.1 Fuentes de corriente. ....	24
1.5.2 Rectificadores. ....	25
1.6 SELECCIÓN PARA RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS EN ESTRUCTURAS ENTERRADAS Y/O SUMERGIDAS. ....	26
1.6.1 Antecedentes de funcionalidad. ....	26
1.6.2 Temperatura de operación.....	26
1.6.3 Tipos de suelo y/o agua .....	26
1.7 CATHODIC DISBONDING (desprendimiento catódico) .....	26
1.7.1 Ampollamiento. ....	28
1.7.2 Corrosión generalizada .....	28
1.7.3 Corrosión en la incisión.....	29
1.7.4 Cuarteamiento. ....	29

1.8 DESPRENDIMIENTO CATÓDICO EN TUBERIAS ENTERRADAS Y/O SUMERGIDAS.....	30
1.9 ENSAYO DE CAMARA DE NIEBLA SALINA .....	31
1.10 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS) .....	31
2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....	33
2.1. UBICACIÓN DEL PROYECTO. ....	33
2.2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA .....	34
2.2.1. Material de prueba. ....	35
2.2.2. Ensayos de laboratorio. ....	38
2.2.3. Cathodic disbonding (desprendimiento catódico). ....	39
2.2.4. Realización de prueba cathodic disbonding (desprendimiento catódico)....	41
2.2.5. Cámara de niebla salina. ....	46
2.2.6. Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica. ....	50
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	52
3.1. CATHODIC DISBONDING (DESPRENDIMIENTO CATÓDICO).....	52
3.2. EVALUACIÓN EN CÁMARA DE NIEBLA SALINA. ....	66
3.3. EVALUACIÓN POR MEDIO DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA.....	66
3.3.1. Impedancia a 0 horas de exposición.....	68
3.3.2. Impedancia a 500 horas de exposición.....	69
3.3.3. Impedancia a 1000 horas de exposición.....	70
3.3.4. Impedancia a 1500 horas de exposición.....	71
3.3.5. Impedancia a 2000 horas de exposición.....	72
3.3.6. Corrosión en la incisión.....	86
3.3.7 Correlación de datos de cathodic disbonding (desprendimiento catódico) y espectroscopia de impedancia electroquímica .....	88
4. CONCLUSIONES .....	91
5. RECOMENDACIONES.....	93
6. BIBLIOGRAFIA .....	94



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aplicación de un recubrimiento en tubería.....	18
Figura 2. Corrosión bajo recubrimiento.....	19
Figura 3. Diagrama potencial -ph para el hierro (fe). ....	23
Figura 4. Esquema de un rectificador monofásico. ....	25
Figura 5. Esquema de un cathodic disbonding. ....	27
Figura 6. Ampollamiento de un recubrimiento.....	28
Figura 7. Corrosión general de una pieza metálica.....	29
Figura 8. Corrosión en la incisión.....	29
Figura 9. Cuarteamiento. ....	30
Figura 10. Cámara de niebla salina. ....	31
Figura 11. Diagrama diseño metodológico. ....	34
Figura 12. Medidas de placas con los recubrimientos. ....	35
Figura 13. Recubrimientos del sistema s. ....	36
Figura 14. Recubrimientos del sistema c. ....	36
Figura 15. Recubrimientos del sistema sk. ....	37
Figura 16. Recubrimientos del sistema p. ....	37
Figura 17. Recubrimientos del sistema p. ....	37
Figura 18. Montaje final de cathodic disbonding. ....	39
Figura 19. Partes del montaje final (cathodic disbonding) ....	41
Figura 20. Diagrama descripción del montaje cathodic disbonding. ....	42
Figura 21. Sistema de calentamiento.....	43
Figura 22. Testigos de referencia. ....	45
Figura 23. Diagrama de corriente impresa.....	45
Figura 24. Ampolla en el recubrimiento. ....	46
Figura 25. Diagrama descripción del montaje de cámara de niebla salina y eis...	47
Figura 26. Niebla salina. ....	48
Figura 27. Incisión en los recubrimientos.....	49
Figura 28. Prueba de espectroscopia de impedancia electroquímica.....	49
Figura 29. Montaje para realización de pruebas de impedancia.....	51
Figura 30. Diagrama de bode. ....	51
Figura 31. Recubrimiento P4. ....	53
Figura 32. Recubrimiento P3. ....	53
Figura 33. Recubrimiento P2. ....	54
Figura 34. Recubrimiento P1. ....	54
Figura 35. Recubrimiento C4. ....	55
Figura 36. Recubrimiento C3. ....	55
Figura 37. Recubrimiento C2. ....	56
Figura 38. Recubrimiento C1. ....	56

Figura 39. Recubrimiento S4. ....	57
Figura 40. Recubrimiento S3. ....	57
Figura 41. Recubrimiento S2. ....	58
Figura 42. Recubrimiento S1. ....	58
Figura 43. Recubrimiento H4. ....	59
Figura 44. Recubrimiento H3. ....	59
Figura 45. Recubrimiento HJ. ....	60
Figura 46. Recubrimiento H1. ....	60
Figura 47. Recubrimiento SK4. ....	61
Figura 48. Recubrimiento SK3. ....	61
Figura 49. Recubrimiento SK2. ....	62
Figura 50. Recubrimiento SK1. ....	62
Figura 51. Recubrimiento P5-C. ....	63
Figura 52. Recubrimiento S5-C. ....	63
Figura 53. Recubrimiento C5-C. ....	64
Figura 54. Recubrimiento H5-C. ....	64
Figura 55. Recubrimiento Sk5-C. ....	65
Figura 56. Incisiones en el sistema C. ....	86
Figura 57. Incisiones en el Sistema S. ....	86
Figura 58. Incisiones en el sistema H. ....	87
Figura 59. Incisiones en el sistema P. ....	87
Figura 60. Incisiones en el sistema SK. ....	88

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ensayos y recubrimientos .....	38
Tabla 2. Impedancia de los recubrimientos. ....	67
Tabla 3. Relación de datos de espectroscopia de impedancia electroquímica vs cathodic disbonding.....	88

## LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Tiempo de ampollamiento. ....	66
Grafica 2. Comportamiento de los recubrimientos. ....	68
Grafica 3. Impedancia A 0 horas de exposición. ....	69
Grafica 4. Impedancia a 500 horas de exposición. ....	70
Grafica 5. Impedancia a 1000 horas de exposición. ....	71
Grafica 6. Impedancia a 1500 horas de exposición. ....	72
Grafica 7. Impedancia a 2000 horas de exposición. ....	73
Grafica 8. Bode recubrimiento C1. ....	74
Grafica 9. Bode recubrimiento C2. ....	74
Grafica 10. Bode recubrimiento C3. ....	75
Grafica 11. Bode recubrimiento C4. ....	75
Grafica 12. Bode recubrimientos S1. ....	76
Grafica 13. Bode recubrimiento S2. ....	77
Grafica 14. Bode recubrimiento S3. ....	77
Grafica 15. Bode recubrimiento S4. ....	78
Grafica 16. Bode recubrimiento H1. ....	79
Grafica 17. Bode recubrimiento HJ. ....	79
Grafica 18. Bode recubrimiento H3. ....	80
Grafica 19. Bode recubrimiento H4. ....	80
Grafica 20. Bode recubrimiento P1. ....	81
Grafica 21. Bode recubrimiento P3. ....	82
Grafica 22. Bode recubrimiento P2. ....	82
Grafica 23. Bode recubrimiento P4. ....	83
Grafica 24. Bode recubrimiento SK1. ....	84
Grafica 25. Bode recubrimiento SK2. ....	84
Grafica 26. Bode recubrimiento SK3. ....	85
Grafica 27. Bode recubrimiento SK4. ....	85
Grafica 28. Comportamiento de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica vs cathodic disbonding. ....	89

## RESUMEN

La presente investigación se basó en la evaluación de recubrimientos comerciales que se utilizan en el campo petrolero, este proyecto comprende un desarrollo progresivo de diferentes etapas que inicia desde la recopilación bibliográfica y revisión del estado del arte, uso de cámara de niebla salina, protección catódica y espectroscopia de impedancia electroquímica. Se estudiaron diferentes recubrimientos comerciales, para determinar el mejor comportamiento frente a las condiciones de estudio.

Para la cámara de niebla salina a los recubrimientos se les realizó una incisión antes de su ingreso, donde se obtuvieron resultados de resistencia al poro por medio de un pontenciostato registrando pruebas cada 500 horas, en un tiempo de exposición de 2000 horas, evidenciándose que el recubrimiento presenta un deterioro en ambientes con alto contenido de cloruros.

Para el cathodic disbonding (desprendimiento catódico) se elaboró un montaje para que los recubrimientos queden suspendidos y que solo la mitad de cada uno quede en la solución de agua con sal, las probetas también estaban sometidas a una sobreprotección catódica con un tiempo de prueba de 2000 horas, se llevó a cabo una inspección visual rutinaria para evidenciar cual posible presencia de ampollamiento o cuarteamiento, realizando un registro fotográfico y se tomó el tiempo en horas en que fallo.

La investigación muestra que utilizando estas técnicas se puede analizar los recubrimientos con una mayor exactitud de su vida útil. Así mismo se pudo concluir y comprobar que la implementación de estos procedimientos, es una herramienta fácil y completa al momento de proteger tuberías, garantizar calidad y un óptimo manejo de tiempo y costos.

Palabras claves: cámara de niebla salina, cathodic disbonding, recubrimientos, protección catódica, ampollamiento, cuarteamiento, electroquímica.

## **ABSTRACT**

The present investigation was based on the evaluation of commercial coatings that are used in the oil field; this project includes a progressive development of different stages that starts from the bibliographic compilation and review of the state of the art, use of salt fog chamber, cathodic protection and electrochemical impedance spectroscopy. Different commercial coatings were studied, in order to determine the best behavior against the studied conditions.

For the salt spray chamber, the coatings were made an incision before entering, where pore resistance results were obtained by means of a potentiostat recording tests every 500 hours, in an exposure time of 2000 hours, evidencing that the coating presents a deterioration in environments with high chloride content.

For the cathodic disbonding (cathodic detachment) an assembly was made so that the coatings are suspended and that only half of each one remains in the salt water solution, the specimens were also subjected to a cathodic overprotection with a time of 2000 hours, a routine visual inspection was carried out to show the possible presence of blistering or cracking, making a photographic record and taking time at times when it failed.

The research shows that using these techniques can analyze the coatings with a greater accuracy of their useful life. It was also possible to conclude and verify that the implementation of these procedures is an easy and complete tool when protecting pipelines, guaranteeing quality and an optimal management of time and costs.

**Keywords:** salt spray chamber, cathodic disbonding, coatings, cathodic protection, blistering, cracking, electrochemistry.

## INTRODUCCIÓN

Las tuberías son la manera más rápida de transportar grandes cantidades de petróleo y gas en tierra o en agua, comparados con los ferrocarriles, tienen un costo menor por unidad y también mayor capacidad. Por ende la necesidad de proteger externamente las tuberías ya que se encuentran expuestas a diferentes ambientes corrosivos, donde sea posible su construcción como tuberías bajo el mar, zonas urbanas o con flora sensible, cuando van bajo tierra su profundidad típica es de 1 metro. De todas las fallas que ocurren en las operaciones de la industria del gas y del petróleo la más importante es la corrosión con el 33% de los casos<sup>1</sup>.

Para tubería enterrada se completa la protección contra la corrosión con sistemas de ánodos de sacrificio o corriente impresa, generando posibles problemas en los recubrimientos por cambios de potencial. La aplicación de pinturas o recubrimientos protectores, en virtud de su versatilidad y eficiencia, ha logrado una buena aceptación como medio de control de la corrosión. Sin embargo cuando se sobreprotege las tuberías catódicamente trae daños en el recubrimiento que se muestran en forma de elevaciones, similares a ampollas de forma irregular.<sup>2</sup>

Uno de los métodos para estudiar los recubrimientos es la cámaras de niebla salina que simulan ambientes corrosivos, este método es diseñado para poder controlar las condiciones de exposición de tal manera que se pueda acelerar el proceso y simular de forma más precisa los ambientes de trabajos. En este proyecto de investigación se llevó a cabo estudios donde se pueda determinar el recubrimiento que mejor se comporte a las condiciones evaluadas.

Esta investigación genero conocimiento para poder predecir la vida útil de los recubrimientos, permitiendo incrementar la efectividad costo-operatividad de las tuberías para alcanzar la reducción de los costos asociados a la renovación de las instalaciones.

---

<sup>1</sup> Linda Gil de Fuentes. Corrosión en la industria del petróleo y el uso de tecnologías de recubrimientos como alternativa de protección. Centro de Estudios de Corrosión. Universidad Nacional Experimental Politécnica. Venezuela

<sup>2</sup> Rendon Gregorio jose. Protección contra la corrosión en tuberías. Ingeniería Continental, S.A (ICONSA). Panamá.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Evaluar recubrimientos poliméricos por medio de cathodic disbonding (desprendimiento catódico) y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.

### **ESPECÍFICOS**

- Elaborar un montaje para aplicar la técnica de cathodic disbonding según la norma ASTM G-8.
- Analizar por medio de técnicas de espectroscopia de impedancia electroquímica el comportamiento de cada recubrimiento a diferentes tiempos de exposición en cámara de niebla salina.
- Determinar la relación entre cathodic disbonding y espectroscopia de impedancia electroquímica en recubrimientos poliméricos en ambientes altamente corrosivos.
- Establecer el recubrimiento que presenta mejores propiedades de protección frente al fenómeno de la corrosión en las condiciones evaluadas.



## 1. MARCO CONCEPTUAL

### 1.1 DEFINICION DE RECUBRIMIENTO:

En términos generales, un recubrimiento anticorrosivo se define como una mezcla o dispersión relativamente estable de un pigmento en una solución de resinas y aditivos. Estos recubrimientos, son materiales aislantes eléctricos, cuya composición o formulación (el producto es presentado de forma líquida o pastosa) debe ser tal que al ser aplicada en capas, siguiendo el procedimiento adecuado, sobre un sustrato metálico; sea capaz de transformarse por un proceso de curado, en una película seca, uniforme, plástica, que actúe como una barrera flexible, adherente que la proteja y/o decore y debe tener máxima eficiencia de protección contra la corrosión. La durabilidad de la película, depende fundamentalmente de su resistencia al medio corrosivo y de la facultad de permanecer adherida al sustrato metálico. La eficiencia de protección contra la corrosión, además de considerar los factores anteriores, depende de la habilidad de la película de recubrimiento y de su espesor, para impedir el acceso de los agentes corrosivos al sustrato metálico, ver (figura 1).

Debemos aclarar que, debido a la diversidad de medios en los que puede encontrarse la superficie metálica a proteger, no existe una pintura universal. La resistencia a la degradación de una película de pintura, como ya se mencionó, está determinada por su composición y la acción destructiva del medio en que se encuentra, por lo que éste deberá ser estudiado con detalle, antes de proceder a la elección del sistema más adecuado.

Un factor importantísimo para la buena capacidad protectora de un recubrimiento, es el espesor de capa depositada. Cuanto mayor sea el espesor de la capa, la humedad y el oxígeno encontrarán más dificultades para su penetración, y con ello disminuirá el peligro de corrosión.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Navarrete Valles, Luis. Estudio del desprendimiento catódico de recubrimientos orgánicos aplicados en superficies de acero. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería 2008.P 24-25

**Figura 1.** Aplicación de un recubrimiento en tubería.



**Fuente:** Grupo TUMEX: aplicación de recubrimientos anticorrosivos<sup>4</sup>

## 1.2 CORROSION EN TUBERIA

El fenómeno de la corrosión se produce debido a que los materiales constructivos, especialmente los metales, se obtienen a partir de especies minerales estables en las condiciones naturales. Al ser expuestos éstos a las condiciones ambientales, una vez extraídos, tienden a estabilizarse química y energéticamente. Por tanto, la corrosión es la destrucción de un metal o metales, a través de la interacción con un ambiente (por ejemplo, suelo o agua) por un proceso electroquímico, es decir, una reacción que envuelve un flujo de corriente eléctrica e intercambio de iones.

La corrosión es un fenómeno inevitable a largo plazo si no se toman las precauciones adecuadas. Puede debilitar la integridad estructural de la tubería y convertirla en un vehículo inseguro para el transporte de cualquier tipo de fluidos ver (figura 2). La corrosión es la principal causa de fallo en las tuberías. El fallo de una tubería puede tener múltiples consecuencias como pérdida de fluido, daños a instalaciones, peligro de perforaciones, posibles episodios de contaminación. Todos estos defectos en los recubrimientos pasivos provocan que la superficie metálica de la estructura entre en contacto electrolítico con el terreno circundante, dándose, en

---

<sup>4</sup> Grupo TUMEX. aplicación de recubrimientos anticorrosivos. 2015. Pag 5

consecuencia, las condiciones necesarias para que el proceso de corrosión pueda comenzar.<sup>5</sup>

El proceso de corrosión en los metales es un proceso electroquímico, donde se suceden reacciones de oxidación y reducción, estableciéndose un intercambio de electrones, y consecuentemente el paso de una corriente eléctrica de componente continua entre un ánodo y un cátodo, a través de un medio conductor (el electrolito citado), como en una pila galvánica.<sup>6</sup>

**Figura 2.** Corrosión bajo recubrimiento.



**Fuente:** MERUS: corrosión<sup>7</sup>

### **1.3 MECANISMOS GENERALES DE PROTECCIÓN DE LAS PELÍCULAS DE RECUBRIMIENTOS**

Considerando la variedad de recubrimientos anticorrosivos disponibles en el mercado, es posible señalar tres mecanismos generales de protección anticorrosiva:

---

<sup>5</sup> Linda Gil de Fuentes. Corrosión en la industria del petróleo y el uso de tecnologías de recubrimientos como alternativa de protección. Centro de Estudios de Corrosión. Universidad Nacional Experimental Politécnica. Venezuela

<sup>6</sup> Linda Gil de Fuentes. Corrosión en la industria del petróleo y el uso de tecnologías de recubrimientos como alternativa de protección. Centro de Estudios de Corrosión. Universidad Nacional Experimental Politécnica. Venezuela

<sup>7</sup> MERUS GmbH-Flüssigkeitsbehandlung.corrosion. 2014

**1.3.1 Barrera impermeable.** Las moléculas de resina se unen o enlazan en tres direcciones ocluyendo al pigmento, da como consecuencia la formación de una barrera que en mayor o menor grado, dependiendo de la calidad del recubrimiento, impide la difusión de los agentes de la corrosión al sustrato.<sup>8</sup>

**1.3.2 Pasivación.** El depósito de recubrimiento sobre el sustrato metálico inhibe los procesos anódicos y catódicos de la corrosión, incluso actúa como un material dieléctrico (alta resistencia eléctrica) que impide el flujo de electrones.<sup>9</sup>

En los últimos años los recubrimientos cerámicos elaborados mediante proyección térmica están siendo ampliamente utilizados para mejorar las propiedades superficiales de piezas o componentes industriales, e incluso para recuperar piezas desgastadas.<sup>10</sup>

**1.3.3 Protección catódica.** Los antecedentes de las técnicas de protección catódica se remontan al descubrimiento del galvanizado o zincado, patentado en Inglaterra en 1836 y luego en Francia en 1876.

Se sabe también que aproximadamente en el año 1824 la protección catódica presenta sus primeros avances gracias a la labor de Sir. Humphrey Davy quien además sentó las bases del sistema. Por ese mismo año, dicho estudioso recomienda la protección del cobre de las embarcaciones uniéndolo con el hierro o zinc al obtener una apreciable reducción del ataque al cobre, sin embargo, debido a los inconvenientes suscitados por la proliferación de organismos marinos se rechazó el sistema de protección catódica ya que estos problemas reincidían directamente en la navegación.<sup>11</sup>

En 1850 y después de un largo período de estancamiento, la marina canadiense, mediante el empleo adecuado de pinturas con sustancias, anti organismos y anticorrosivos, demostró que económicamente era factible el uso de la protección catódica en embarcaciones, pues se redujeron costos de proceso y mantenimiento. No obstante, fue a partir de 1910, que tanto Estados Unidos como Inglaterra,

---

<sup>8</sup> Navarrete Valles, Luis. Estudio del desprendimiento catódico de recubrimientos orgánicos aplicados en superficies de acero. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería 2008. P 28-29

<sup>9</sup> Dr. Ricardo Orozco Cruz. Recubrimientos anticorrosivos. Universidad Veracruzana. Ingeniería química.

<sup>10</sup> Edward Restrepo, Mónica Monsalve, Andrés Gonzalez, Fabio Vargas, Guillermo Latorre, Esperanza López. Influencia de los esfuerzos residuales en la adherencia de recubrimientos de  $Al_2O_3$ -40%  $TiO_2$  depositados mediante proyección térmica por combustión. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Noviembre –diciembre 2016. P 219-227

<sup>11</sup> Saavedra Cornejo, Walter Enrique. "Optimización del Sistema de Protección Catódica en le Oleoducto Nor-Peruano". Tesis (Titulado en Ingeniería Industrial). Piura: Universidad de Piura, 1988. P 25

efectuaron las primeras aplicaciones por corriente impresa en estructuras enterradas. A partir de este momento, ésta tecnología ha ido evolucionando lentamente, poniendo énfasis en la aplicación de materiales anticorrosivos y en la implementación de los sistemas de protección, quedando todavía un amplio campo de exploración alrededor de los parámetros o factores del entorno, como son las resistividades, el pH, las temperaturas, las corrientes erráticas, que cada vez más se vienen tomando en cuenta.<sup>12</sup>

La protección catódica es una técnica de control de la corrosión, que está siendo usada con mayor éxito en el mundo entero. Esto se debe a que cada vez más se hacen necesarias nuevas instalaciones que debido a sus condiciones de operación, requieren de una integridad absoluta. A continuación se mencionan algunos campos de aplicación frecuente de esta técnica:

- Exterior de tanques metálicos enterrados o sumergidos, contenedores de cualquier producto como gas, agua, combustibles, productos químicos, etc.
- Exterior de tuberías metálicas enterradas o sumergidas, que conduzcan cualquier tipo de fluido o producto sólido, líquido o gaseoso.
- Fondo exterior de tanques apoyados en el suelo o sobre el agua, que contengan cualquier producto.
- Exterior de estructuras metálicas de sustentación, enterradas o sumergidas. Entre éstas estarían pantalanés, muelles, plataformas petrolíferas flotantes o fijas, torres, etc.
- Estructuras de hormigón armado con ataque por corrosión, tanto enterradas, sumergidas o aéreas, como el caso de puentes, muelles, edificios, etc.
- Exterior de barcos y construcciones metálicas relacionados con la navegación, como boyas, diques flotantes, etc., parcialmente sumergidos, tanto para agua marina como dulce.
- Interior de tanques y tuberías metálicas que contengan o conduzcan un producto conductor, como el agua marina, dulce, fría o caliente, para todo tipo de aplicaciones industriales y domésticas. Algunos ejemplos, pueden ser el interior de calderas, acumuladores, tanques de reserva de agua, parte baja de tanques de combustible, cubas, decantadores, etc.
- Elementos enterrados o sumergidos de sistemas eléctricos y telefónicos, como las armaduras de cables, puestas a tierra, etc.<sup>13</sup>

Tanto el acero, como el cobre, plomo, latón, aluminio, aceros inoxidables y bronce, son algunos de los metales que pueden ser protegidos de la corrosión por este método. También mediante ésta técnica, se puede eliminar el agrietamiento por

---

<sup>12</sup> Saavedra Cornejo, Walter Enrique. "Optimización del Sistema de Protección Catódica en le Oleoducto Nor-Peruano". Tesis (Titulado en Ingeniería Industrial). Piura: Universidad de Piura, 1988. P 25

<sup>13</sup> Navarrete Valles, Luis. Estudio del desprendimiento catódico de recubrimientos orgánicos aplicados en superficies de acero. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería 2008. P 61-62

corrosión bajo tensiones, corrosión intergranular, picaduras o ataques generalizados. No se puede emplear para evitar la corrosión en áreas de metal que no están en contacto con un electrolito.<sup>14</sup>

Se han empleado algunos criterios para determinar si una estructura está protegida o no de la corrosión. La Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión (NACE) especifica algunos criterios que son importantes para determinar cuándo, una estructura de acero está siendo protegida catódicamente, entre los que tenemos:

1. Un potencial estructura-electrolito (catódico) mínimo de  $-0.850$  V, medido respecto al electrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub> saturado (SCS), ver diagrama de *Pourbaix* (figura 3). La determinación de este voltaje debe hacerse con la corriente de protección aplicada.<sup>15</sup>
2. Un cambio de potencial estructura-suelo mínimo de  $-0.300$  V producido por la aplicación de la corriente de protección. El cambio de potencial se mide respecto al electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre. La determinación de este potencial debe efectuarse con la corriente de protección aplicada. Este criterio se aplica a estructuras que no están en contacto con metales disímiles.<sup>16</sup>
3. Un potencial de protección estructura-electrolito (catódico) de  $-0.950$  V, medido respecto al electrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub> saturado(SCS), cuando el área circundante de la estructura se encuentre en condiciones anaeróbicas, y estén presentes microorganismos asociados al fenómeno de corrosión, como las bacterias sulfato-reductoras.<sup>17</sup>
4. Un desplazamiento del Ecor de  $100$  mV en dirección negativa, determinado por la interrupción de la corriente, y eliminando la caída óhmica; es decir, un cambio de potencial de polarización mínimo de  $-0.100$  V medido entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado en contacto con el electrolito. Este cambio de potencial de polarización, debe determinarse interrumpiendo la corriente de protección y midiendo el abatimiento de la polarización. Al interrumpir la corriente, ocurre un cambio inmediato de potencial.

---

<sup>14</sup> Saavedra Cornejo, Walter Enrique. "Optimización del Sistema de Protección Catódica en le Oleoducto Nor-Peruano". Tesis (Titulado en Ingeniería Industrial). Piura: Universidad de Piura, 1988. P 25

<sup>15</sup> NACE Standard, (1999). "Standard Recommended Practice RP-090-90: Cathodic Protection of Reinforcing steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures". National Association of Corrosion engineers, Houston, Texas, USA.

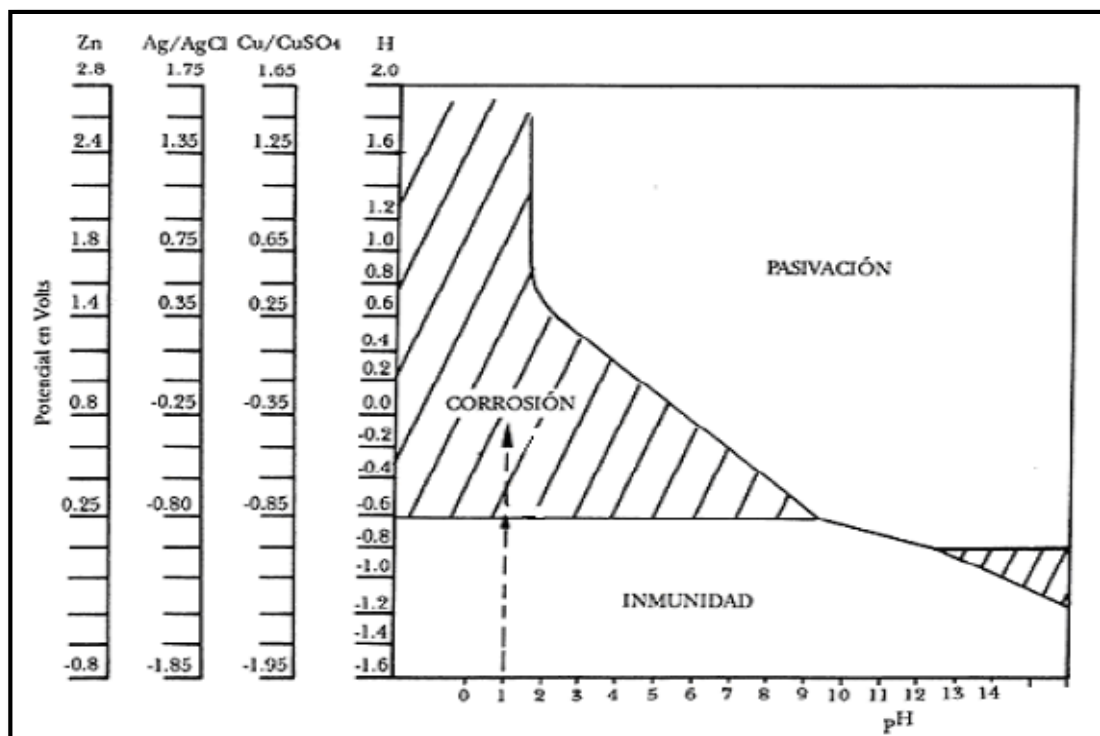
<sup>16</sup> Pemex CID-NOR-N-SI-0001. "Requisitos mínimos de seguridad para el diseño, construcción, operación, mantenimiento e inspección de ductos de transporte". 14-Agosto-1998. P 229

<sup>17</sup> Pemex PROY-NRF-047-PEMEX-2002. "Diseño, instalación y mantenimiento para los sistemas de protección catódica". P 11

La lectura del potencial después del cambio inmediato, debe usarse como base de la lectura a partir de la cual, se mide el abatimiento de la polarización.<sup>18</sup>

La protección catódica, teóricamente se basa en ubicar al potencial del acero enterrado y/o sumergido, dentro de la zona de inmunidad, en el correspondiente diagrama de estabilidad termodinámica o de Potencial-pH, más conocido como diagrama de Pourbaix.

**Figura 3.** Diagrama potencial -pH para el Hierro (Fe).



**Fuente:** Protección catódica de sondeos de captación de agua<sup>19</sup>

## 1.4 RECUBRIMIENTOS COMO ÁNODO DE SACRIFICIO

Cierto tipo de recubrimientos con alto contenido de Zinc como pigmento, actúan anódicamente al ser aplicados sobre el Acero. En este caso el sustrato metálico

<sup>18</sup> NACE Standard, (1999). art. cit.

<sup>19</sup> Alméstár Mauricio, Jorge Reynaldo. "Simulación de curvas equipotenciales en protección catódica mediante el uso de Algor Electrostat". Tesis (Titulado en Ingeniería Mecánica-Eléctrica). Piura. Universidad de Piura, 2004. Pag 22

es sujeto a una protección catódica con el Zinc como ánodo de sacrificio y no por la formación de una película impermeable.<sup>20</sup>

La estabilidad del zinc en un medio agresivo depende de las propiedades protectoras de la película que desarrolla, cuya composición química y estructura determinan su comportamiento como barrera que controla el tipo de ataque y la velocidad de corrosión.<sup>21</sup>

**1.4.1 Recubrimiento y protección catódica.** La combinación de recubrimientos y protección catódica (CP) se diseña generalmente para el control de corrosión de tuberías de acero enterradas. El recubrimiento es el sistema de control de la corrosión primaria, mientras que CP es un sistema de protección complementaria destinada a prevenir la corrosión a defectos del recubrimiento, en el que el tubo de acero está expuesto al entorno electrolítico. Sin embargo, la corrosión y el agrietamiento por tensión de corrosión (SCC) se producen bajo recubrimientos desunidos, que pueden impedir el acceso de la corriente de protección catódica al acero. SCC por debajo del recubrimiento desunido, sigue siendo un gran problema para la gestión de integridad de tuberías de alta presión. Tanto el acero, como el cobre, plomo, latón, aluminio, aceros inoxidables y bronce, son algunos de los metales que pueden ser protegidos de la corrosión por este método. También mediante ésta técnica, se puede eliminar el agrietamiento por corrosión bajo tensiones, corrosión intergranular, picaduras o ataques generalizados. No se puede emplear para evitar la corrosión en áreas de metal que no están en contacto con un electrolito.<sup>22</sup>

## 1.5 CORRIENTE IMPRESA

**1.5.1 Fuentes de corriente.** El sistema de corriente impresa requiere de una fuente de corriente continua, no importa de dónde provenga a condición de que se mantenga pese al paso del tiempo. Un sistema de corriente impresa debe de poder funcionar de forma permanente, al menos durante diez años.

---

<sup>20</sup> Navarrete Valles, Luis. Estudio del desprendimiento catódico de recubrimientos orgánicos aplicados en superficies de acero. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería 2008. P 39

<sup>21</sup> Suárez-Corrales Xenia Isbel, Villar-López René Valentino, Corvo-Pérez Francisco Eduardo. Resistencia al clima tropical de aceros galvanizados con y sin recubrimiento. Ingeniería, Investigación y Tecnología. Enero-Marzo 2014. P 29-40

<sup>22</sup> YAN Maocheng, XU Jin, YU Libao, WU Tangqing, SUN Cheng, KE Wei. EIS analysis on stress corrosion initiation of pipeline steel under disbonded coating in near-neutral pH simulated soil electrolyte. Corrosion Science. September 2016. P 23-34

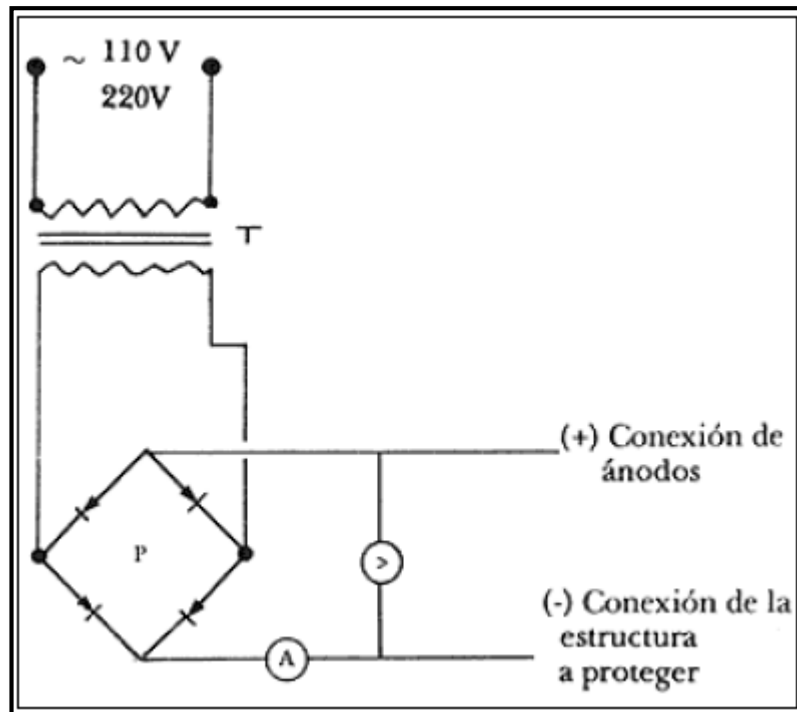


**1.5.2 Rectificadores.** Los aparatos que permiten el paso de la corriente en un solo sentido, se conocen con el nombre de rectificadores.

Estos aparatos se alimentan con corriente alterna, para luego transformarla en corriente continua de bajo voltaje mediante diodos de rectificación, comúnmente de selenio o silicio, y con la ayuda de sistemas de adecuación regulable manual y/o automática, a fin de regular las características de la corriente según las necesidades del sistema a proteger.

En la (figura 4) se muestra un rectificador monofásico está constituido por un transformador monofásico T, alimentado en el primario a 110 o 220 V (tensión de la red de distribución). Un puente monofásico reductor P, compuesto por 4 diodos o grupos de diodos de selenio o silicio. Este puente reduce las dos alternancias de la corriente monofásica.<sup>23</sup>

**Figura 4.** Esquema de un rectificador monofásico.



**Fuente:** Más allá de la Herrumbre II: La lucha contra la corrosión<sup>23</sup>

<sup>23</sup> Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. "Más allá de la Herrumbre II: La lucha contra la corrosión". 1989, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 79. México.

## **1.6 SELECCIÓN PARA RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS EN ESTRUCTURAS ENTERRADAS Y/O SUMERGIDAS.**

Para seleccionar adecuadamente un recubrimiento anticorrosivo para tuberías enterradas, sumergidas e interfases; es necesario considerar los siguientes factores:

**1.6.1 Antecedentes de funcionalidad.** El sistema genérico de recubrimiento seleccionado debe contar con evidencia documentada de haber sido utilizado anteriormente en ductos, en este caso tuberías enterradas y/o sumergidas, e interfases. Se debe tener en cuenta que las condiciones ambientales, de diseño y de operación deben ser similares al ducto que se pretende proteger. Lo anterior debe contar con información nacional y/o internacional.

**1.6.2 Temperatura de operación.** El sistema de recubrimiento anticorrosivo debe conservar sus propiedades protectoras a la temperatura de servicio del ducto. Dentro de las normas *ASTM* (Sociedad Americana para Ensayos de Materiales) y *CSA* (Organización Canadiense de Estándares), hay algunas que muestran los sistemas genéricos de recubrimientos y sus requerimientos mínimos de aceptación para su selección.

**1.6.3 Tipos de suelo y/o agua.** Para el caso de proyectos nuevos, el diseñador debe contar con información relacionada al tipo de suelo y/o agua, entre otros:

- Tipo de suelo: arcilloso, rocoso, calcáreo, fangoso, ácido, básico, etc.
- Concentración de sales en el suelo o agua.
- Porosidad del suelo.
- Otros contaminantes en suelo y/o agua.
- Resistividad del suelo <sup>24</sup>

## **1.7 CATHODIC DISBONDING (desprendimiento catódico)**

Desprendimiento catódico es uno de los principales procesos de degradación de los recubrimientos orgánicos sobre estructuras de acero bajo protección catódica. La protección catódica disminuye la corrosión, pero hace que la superficie catódica sea fuertemente alcalina generando hidrógeno en las superficies metálicas expuestas. El efecto combinado causa una pérdida de adhesión del recubrimiento orgánico

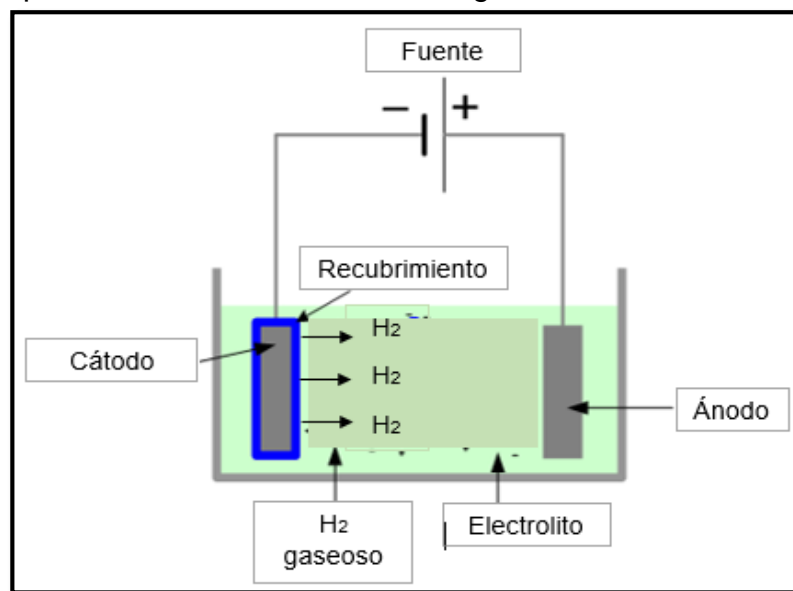
---

<sup>24</sup> Pemex NRF-026 PEMEX-2001. "Protección con recubrimientos anticorrosivos para tuberías enterradas y/o sumergidas". P 12-13.

alrededor de las áreas dañadas y permitir la entrada de electrolito. En la década de 1960 se desarrollaron pruebas de desprendimiento catódico, lo que lleva a la publicación de norma ASTM G-8, en la que se introdujo un defecto artificial para simular las áreas de daño de un recubrimiento. Muchas otras versiones de la prueba basada en el mismo principio han entrado en uso para adaptarse a otras condiciones o tipos de recubrimientos.

Esto hace que el desprendimiento catódico sea una herramienta esencial para el control de calidad de recubrimientos de tuberías y otros equipos en un entorno reactivo, ver (figura 5).

**Figura 5.** Esquema de un cathodic disbonding.



**Fuente:** Dr. KOPELIOVICH Dmitri. Deposición electroforética <sup>25</sup>

Aplicaciones de control de calidad de las pruebas de desprendimiento catódico son:

- Los buques y embarcaciones.
- Marina - espigones, puertos y estructuras.
- Puente, edificio, un dique construcción - acero en el hormigón - el refuerzo del hormigón, recubrimiento de barras de refuerzo, acero recubierto de barras de refuerzo.
- El acero galvanizado - galvanizado por inmersión en caliente.
- Tuberías construidas a partir de acero.
- Tuberías construidas de hormigón.<sup>26</sup>

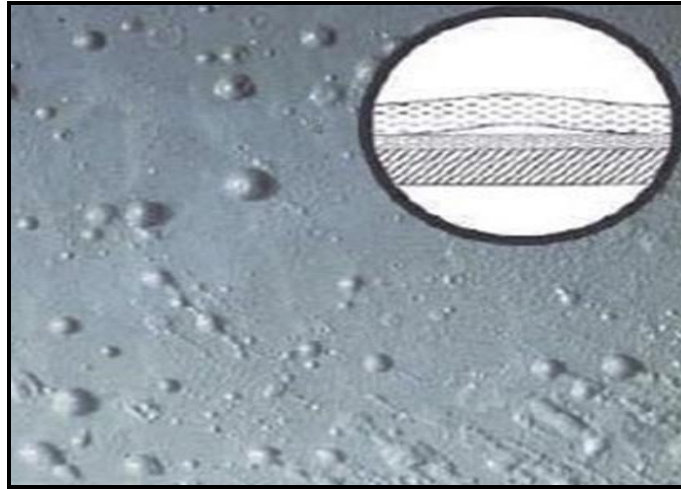
<sup>25</sup> Dr. KOPELIOVICH Dmitri. Deposición electroforética. Octubre 2013, Pag 65

<sup>26</sup> J.L. Luo, C.J. Lin, Q. Yang, S.W. Guan. Cathodic disbonding of a thick polyurethane coating from steel in sodium chloride solution. Progress in Organic Coatings. June 1997. P 289–295

Las probetas pueden presentar ampollamiento, corrosión generalizada, corrosión en la incisión y cuarteamiento después de practicar la técnica.

**1.7.1 Ampollamiento.** El ampollamiento del recubrimiento también puede ser provocado por la migración del agua hacia la superficie metálica a través del recubrimiento ver (figura 6), bajo la acción del campo eléctrico (fenómeno de electroósmosis).

**Figura 6.** Ampollamiento de un recubrimiento.



**Fuente:** Caracterización de recubrimientos.<sup>27</sup>

**1.7.2 Corrosión generalizada.** Este tipo de corrosión actúa en forma uniforme en toda la superficie del material, y se debe al debilitamiento uniforme de la película de pasivación (óxido de cromo) sobre toda la superficie del acero ver (figura 7).

---

<sup>27</sup> Pintura acuaria. Caracterización de recubrimientos. Ampollamiento, Pag 43

**Figura 7.** Corrosión general de una pieza metálica.



**Fuente:** Fundamentos Contra la Corrosión: ALGO MÁS DE TEORÍA.<sup>28</sup>

**1.7.3 Corrosión en la incisión.** Formación de focos de corrosión, para evidenciar daños del sustrato en la zona de incisión ver (figura 8).

**Figura 8.** Corrosión en la incisión



**Fuente:** Evaluación de recubrimientos protectores.<sup>29</sup>

**1.7.4 Cuarteamiento.** Daños en el recubrimiento que se muestran en forma de elevaciones, similares a ampollas, de forma irregular. Si las ampollas se rompen,

---

<sup>28</sup> Vitolo jhon M. Fundamentos contra la corrosión. España, 2013. Pag 122

<sup>29</sup> A. Rocha Jaime, Velarde Javier, Terán Rosse Mary y Caballero Cristian. Evaluación de recubrimientos protectores en las ciudades de la paz, - caracterización de corrosividad de atmósferas. Cochabamba y Santa cruz. Pag 68

las manchas de corrosión son claramente visibles (polvo marrón sobre acero, o blanco sobre aluminio) ver (figura 9).

**Figura 9.** Cuarteamiento.



**Fuente:** Contra la Corrosión: ALGO MÁS DE TEORÍA .<sup>29</sup>

### **1.8 DESPRENDIMIENTO CATÓDICO EN TUBERIAS ENTERRADAS Y/O SUMERGIDAS.**

Microscópicamente existen orificios en la superficie del recubrimiento o pintura que cubre la superficie metálica de la tubería, sin embargo, son demasiado pequeños como para que el hidrógeno gaseoso ( $H_2$  (gaseoso)), que se forma debido a la electrólisis del agua, salga a través de ellos. Es así que, se van formando pequeñas burbujas o ampollas de gas entre la superficie de la tubería y la película de pintura. Este hidrógeno con el tiempo, va ejerciendo una presión contra la capa de pintura; la capa resistirá hasta que llegue un momento en que se rompa y exponga una fracción de la superficie de la tubería, permitiendo la entrada de la humedad a través de ella dando paso a la oxidación del metal. A esto se le conoce como desprendimiento catódico (cathodic disbonding), en base a que la pintura se deteriora por la formación de ampollas, siendo este un lugar propicio para la corrosión. El tiempo para que las ampollas formadas se rompan, depende de la fragilidad de la pintura. El diámetro de las ampollas puede variar, dependiendo del tamaño de la superficie metálica. Otro punto a considerar es la preparación superficial, ya que mientras esta se realice de la mejor manera, mayor resistencia al desprendimiento catódico habrá en la tubería.

Como ya se dijo anteriormente, para evitar de alguna manera la corrosión de las estructuras metálicas, se usan sistemas duales de protección. Estos sistemas tienen como inconveniente, que a potenciales muy negativos, (es decir menores a  $-1500$

mV, valor que depende de la resistencia que tenga el recubrimiento al desprendimiento catódico), se corre el riesgo de sobreprotección debido al exceso de electricidad. Por tanto, afecta de manera muy considerable al recubrimiento de la pintura, debido a que ocurre una reacción catódica de reducción de hidrógeno gaseoso en la superficie (formación y desprendimiento de  $H_2$ ), que se manifiesta con un ampollamiento en la pintura.<sup>30</sup>

## 1.9 ENSAYO DE CAMARA DE NIEBLA SALINA

Se define como cámara salina, o cámara de corrosión por niebla salina, a un sistema capaz de reproducir las condiciones corrosivas existentes en ambientes climáticos químicamente activos, tales como la niebla salina marina ver (figura 10), la contaminación urbana o la contaminación industrial.<sup>31</sup>

**Figura 10.** Cámara de niebla salina.



**Fuente:** Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia, Incitema<sup>32</sup>

## 1.10 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS)

La ventaja de espectroscopia de impedancia electroquímica sobre otras técnicas electroquímicas radica en que esta obtiene una visión más completa de todo el

<sup>30</sup> Navarrete Valles, Luis. Estudio del desprendimiento catódico de recubrimientos orgánicos aplicados en superficies de acero. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería 2008. P 81

<sup>31</sup> Laverde Laverde Víctor Hugo, Ing. John Jairo Olaya. Diseño y fabricación de una cámara salina para realizar análisis de corrosión en materiales. Universidad nacional de Colombia. 2011

<sup>32</sup> UPTC. Laboratorio de corrosión acelerada, Incitema.

proceso de deterioro del recubrimiento, permite ver procesos con tiempo de estabilización cortos que no pueden observarse en otras técnicas, debido al enmascaramiento por otros procesos. La espectroscopia de impedancia electroquímica, en conjunto con ensayos acelerados, puede proveer información importante sobre los mecanismos de deterioro y, por lo tanto, del desempeño de los recubrimientos en tiempos relativamente cortos (aproximadamente 3.000 horas), respecto a los tiempos de degradación real que pueden ser hasta diez años. Además, los parámetros calculados a partir de las lecturas de impedancia suelen ser muy exactos; pero infortunadamente no son reproducibles en general, porque pequeños cambios en la superficie del sustrato o algún defecto en la aplicación del recubrimiento pueden generar diferencias significativas en las curvas de impedancia. Se recomienda realizar, al menos, tres ensayos de cada sistema de pinturas.

La medición de espectroscopia de impedancia electroquímica busca evaluar parámetros del sistema metal-recubrimiento que permitan evaluar su desempeño. Si estos análisis se realizan a lo largo del tiempo en muestras sometidas a diferentes condiciones, se puede determinar la historia del deterioro y, por lo tanto, identificar los factores que intervienen más fuertemente en el estado de los esquemas de pintura. El comportamiento anticorrosivo de un recubrimiento depende principalmente de propiedades dieléctricas del recubrimiento, adhesión del recubrimiento al sustrato, filtración del agua a través del recubrimiento, penetración iónica, pigmentos y aditivos anticorrosivos, envejecimiento del recubrimiento, pretratamiento de superficie, porosidad y defectos en el recubrimiento, características de la superficie del sustrato, condiciones ambientales y reacciones electroquímicas complejas en la interfase sustrato-recubrimiento.<sup>33</sup>

El proceso más común en Norte América es el ensayo descrito en la norma ASTM G-3, Normas Convencionales para medidas electroquímicas en corrosión. En el procedimiento experimental más comúnmente usado, se aplica una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. No obstante, en ciertas circunstancias, es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencial del sistema. Así, el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial - tiempo y corriente - tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina “espectro de impedancias”.<sup>34</sup>

---

<sup>33</sup>Bedoya-Lora Franky, Calderón-Gutiérrez Jorge, Bermúdez-Castañeda Ángela, Castaño-González Juan, Echeverría-Echeverría Félix, Maya-Montoya Juan. Análisis de los factores de mayor influencia en la evaluación del desempeño de recubrimientos orgánicos mediante ensayos acelerados y espectroscopia de impedancia electroquímica. Grupo de Corrosión y Protección de la Universidad de Antioquia e ISA, Medellín, Colombia

<sup>34</sup> Mendoza Juan, Flores Rubén, Romero Durán, Genescá Llongueras Joan. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en corrosión. Facultad de química, Instituto Mexicano Del Petróleo.



## 2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

### 2.1. UBICACIÓN DEL PROYECTO.

El proyecto se desarrolló en los laboratorios de INCITEMA ubicados dentro de la UPTC, aquí se encuentran los equipos y herramientas que se requieren para el desarrollo del proyecto relacionado a continuación:

1. Computadores con software requeridos:

- Gamry framework versión 5.4
- Gamry echem analyst versión 5.67

2. Rectificador, con las siguientes características.

- Transformador monofásico T
- Una alimentación de 110 o 220 V
- Monofásico reductor P
- Compuesto por 4 diodos

3. Camara de niebla salina, con las siguientes características.

- Capacidad en litros 1000
- Angulo de base-probeta 30° respecto a la vertical
- Temperatura máxima 40 °C
- Cantidad de probetas maximo 42
- Compresor de 150 libras

4. Potenciostato (PCI4) ref 750, con las siguientes características:

- Corriente tensión:  $> \pm 15V$  a 15 mA,  $> \pm 12$  voltios a 500 mA.
- Corriente de salida:  $> \pm 750$  mA.
- Ancho de banda de ganancia de unidad:  $> 1$  MHz,  $> 200$  kHz,  $> 90$  kHz,  $> 20$  kHz.
- Velocidad de desplazamiento:  $> 50$  V/ $\mu$ sec,  $> 10$  V/ $\mu$ sec,  $> 5$  V/ $\mu$ sec,  $> 1$  V/ $\mu$ sec.
- Impedancia de entrada:  $> 4 \times 10^{11} \Omega$  en paralelo con 5 pF.
- Corriente de entrada:  $< 10$  pA CMRR:  $> 100$  dB (DC a 2 kHz),  $> 60$  dB a 100 kHz
- Impedancia de entrada: 100 k $\Omega$ <sup>35</sup>

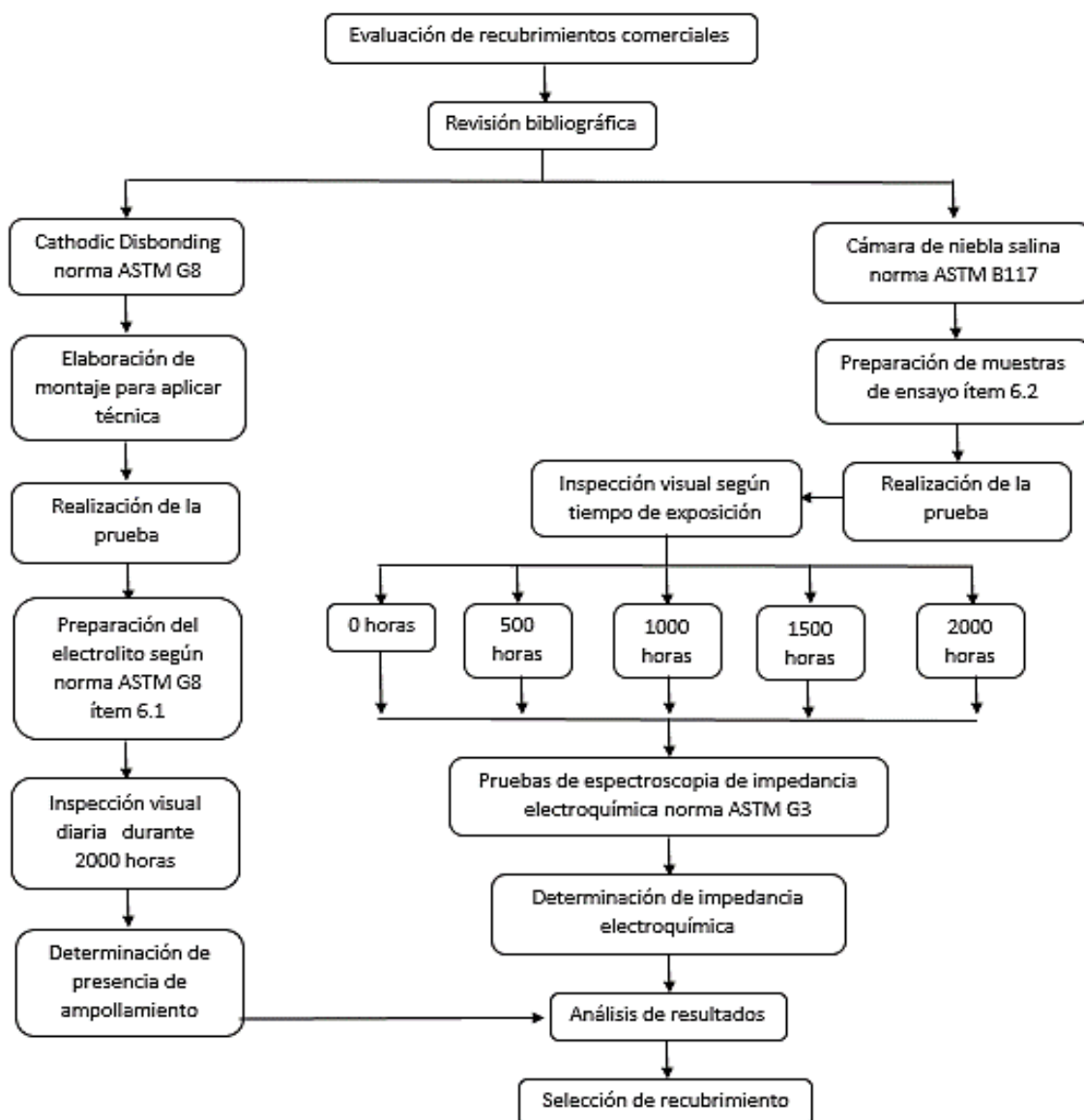
---

<sup>35</sup> Mr. Gregory A. Martinchek, PHD. Title: President. Gamry Instruments. 734 Louis Drive. Warminster, PA 18974, USA

## 2.2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

Esta investigación busca evaluar el comportamiento de recubrimientos comerciales, utilizando las técnicas de cathodic disbonding (desprendimiento catódico), cámara de niebla salina y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) (ver figura 11).

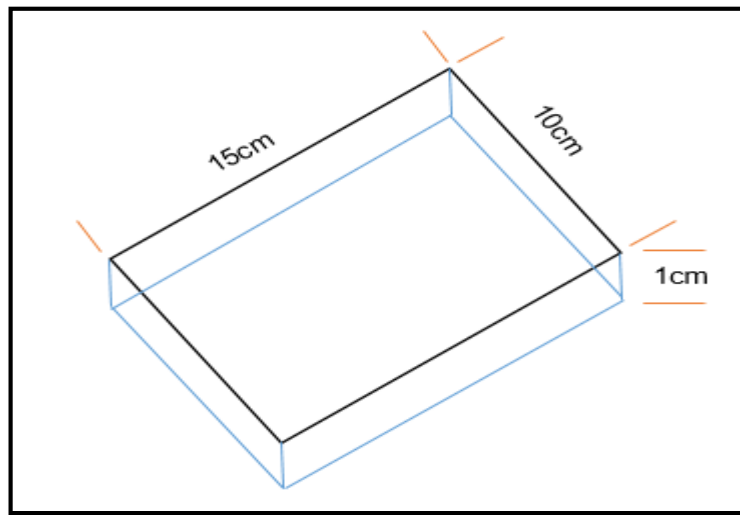
**Figura 11.** Diagrama diseño metodológico.



**Fuente:** Autor

**2.2.1. Material de prueba.** Este es un trabajo de investigación que viene de una problemática de unas empresas en el campo petrolero, la composición química, el tratamiento superficial del sustrato y la técnica de aplicación de cada recubrimiento es confidencial según las empresas, por acuerdos contractuales con el cliente ya que la norma lo permite, el sustrato es un acero 1020, la nomenclatura de cada recubrimiento fue establecida por el proveedor, en la (figura 12), se muestra las medidas de todas las placas.

**Figura 12.** Medidas de placas con los recubrimientos.



**Fuente:** Autor

De las figuras 13 a la 17 se presentan los recubrimientos que se sometieron a las pruebas de cathodic disbonding (desprendimiento catódico), cámara de niebla salina que iba acompañada de pruebas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS). Se realizó inspección visual a una cantidad de 25 probetas, cada una está dividida en cinco grupos con cinco probetas cada uno. A su vez, cada grupo corresponde a un proveedor de pintura diferente, es decir, hay cinco sistemas de recubrimientos de diferentes proveedores en evaluación.

Empresa 1: Sistema **S** con cinco recubrimientos que se representan en la figura 13.

**Figura 13.** Recubrimientos del sistema **S**.



**Fuente:** Autor

Empresa 2: Sistema **C** con cinco recubrimientos que se representan en la figura 14.

**Figura 14.** Recubrimientos del sistema **C**.



**Fuente:** Autor

Empresa 3: Sistema **SK** con cinco recubrimientos que se representan en la figura 15.

**Figura 15.** Recubrimientos del sistema SK.



**Fuente:** Autor

Empresa 4: Sistema **P** con cinco recubrimientos que se representan en la figura 16.

**Figura 16.** Recubrimientos del sistema **P**.



**Fuente:** Autor

Empresa 5: Sistema **H** con cinco recubrimientos que se representan en la figura 17.

**Figura 17.** Recubrimientos del sistema **H**.



**Fuente:** Autor

**2.2.2. Ensayos de laboratorio.** Los recubrimientos deberán satisfacer los requisitos expuestos por las especificaciones generales de construcción de tuberías, por ello se hace la evaluación y selección de los recubrimientos. En la (tabla 1), se muestra los ensayos realizados a los recubrimientos.

**Tabla 1.** Ensayos y recubrimientos

RECUBRIMIENTOS	ENSAYOS		
NOMENCLATURA	CD	CNS	EIS
S1	✓	✓	✓
S2	✓	✓	✓
S3	✓	✓	✓
S4	✓	✓	✓
C1	✓	✓	✓
C2	✓	✓	✓
C3	✓	✓	✓
C4	✓	✓	✓
SK1	✓	✓	✓
SK2	✓	✓	✓
SK3	✓	✓	✓
SK4	✓	✓	✓
P1	✓	✓	✓
P2	✓	✓	✓
P3	✓	✓	✓
P4	✓	✓	✓
H1	✓	✓	✓
H3	✓	✓	✓
H4	✓	✓	✓
HJ	✓	✓	✓
S5-C	✓	x	x
C5-C	✓	x	x
SK5-C	✓	x	x
P5-C	✓	x	x
H5-C	✓	x	x

CD: Cathodic Disbonding (desprendimiento catódico)

CNS: Cámara de Niebla Salina

EIS: Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

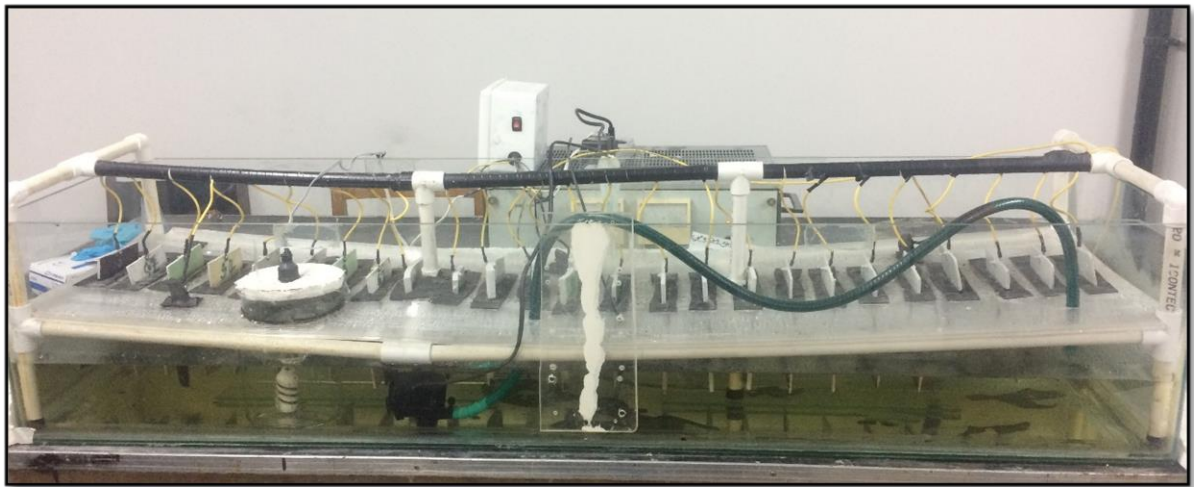
**Fuente:** Autor.

**2.2.3. Cathodic disbonding (desprendimiento catódico).** El propósito primordial de la protección catódica, es proveer al metal los electrones que pierde, debido al proceso de oxidación. El suministro de los electrones se puede realizar por dos vías: corriente impresa y por ánodos de sacrificio, para el caso de las pruebas realizadas se llevó a cabo por corriente impresa.

La corriente eléctrica que fluye a través de la probeta es directamente proporcional a la tensión, La cual convierte la sal (NaCl) que contiene la solución (electrolito), en el clorato altamente agresivo ( $\text{ClO}^-$ ). El efecto más aparente de la conversión es la destrucción oxidante del recubrimiento. Todos los parámetros de ensayo que aumentan la concentración del oxidante, aumentarán su actividad y por consiguiente, la delaminación-adelgazamiento del recubrimiento.

**2.2.3.1. Elaboración del montaje.** Para el desarrollo de la técnica de cathodic disbonding se elaboró un montaje que cumpliera con las condiciones de estudio. El montaje está compuesto de una estructura hecha en tubos PVC, un tanque de vidrio, un sistema de control de temperatura, corriente y voltaje como se observa en la (figura 18).

**Figura 18.** Montaje final de cathodic disbonding.



**Fuente:** Autor

**2.2.3.2. Montaje Estructural.** Para la construcción del montaje estructural fue necesario:

- 1 Lámina de policarbonato
- 5 metros de tubo PVC

- 7 rollos de cinta aislante
- 6 Tapones de caucho
- 4 codos en PVC
- 12 uniones T en PVC
- 2 frascos de soldadura para PVC
- 1 tanque de vidrio

La estructura del montaje se elaboró en tubos de policloruro de vinilo (PVC) y el tanque en vidrio, con dos objetivos principales, el primero que la estructura no presentara alguna reacción química con la solución electrolítica es decir que no muestra deterioro por fenómenos asociados a la corrosión y el segundo como soporte estructural de cada una de las probetas y demás elementos asociados al montaje. El vidrio permite la visualización de las probetas en el interior del tanque y así tener un control del tiempo en que fallan el recubrimiento.

**2.2.3.3 Montaje sistema de control e instrumentación.** Para la construcción del montaje eléctrico fue necesario:

- Arduino 1
- Rele de estado sólido marca schneider
- Placa circuito de vaquelita
- Potenciómetro
- Resistencias
- Display lcd para arduino
- Termo cupla Dc
- Caja de paso
- Switch on/off

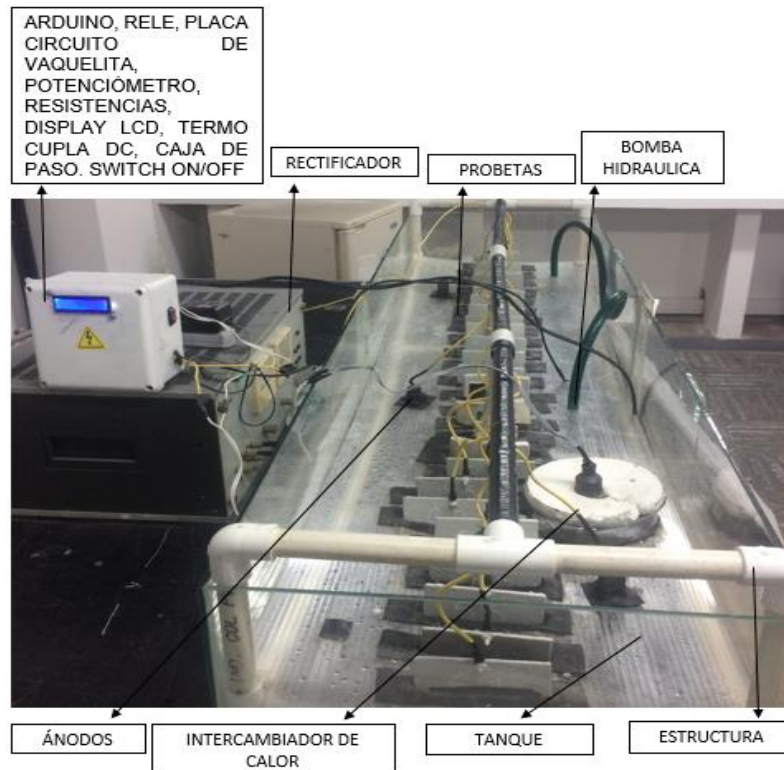
El montaje eléctrico está articulado en dos secciones, una encargada de proporcionar la corriente directa, necesaria para que surja el fenómeno de protección catódica por corriente impresa en la placas sometidas al ensayo, y otra parte encargada proporcionar las condiciones de temperatura exigidas por la norma ASTM G8 para la realización del ensayo.<sup>36</sup> Las partes del montaje final se observan en la (figura 19).

---

<sup>36</sup> ASTM G-8 “Standard Test Methods for Cathodic Disbonding of Pipeline Coatings”, ASTM International, 2010



**Figura 19.** Partes del montaje final (cathodic disbonding)

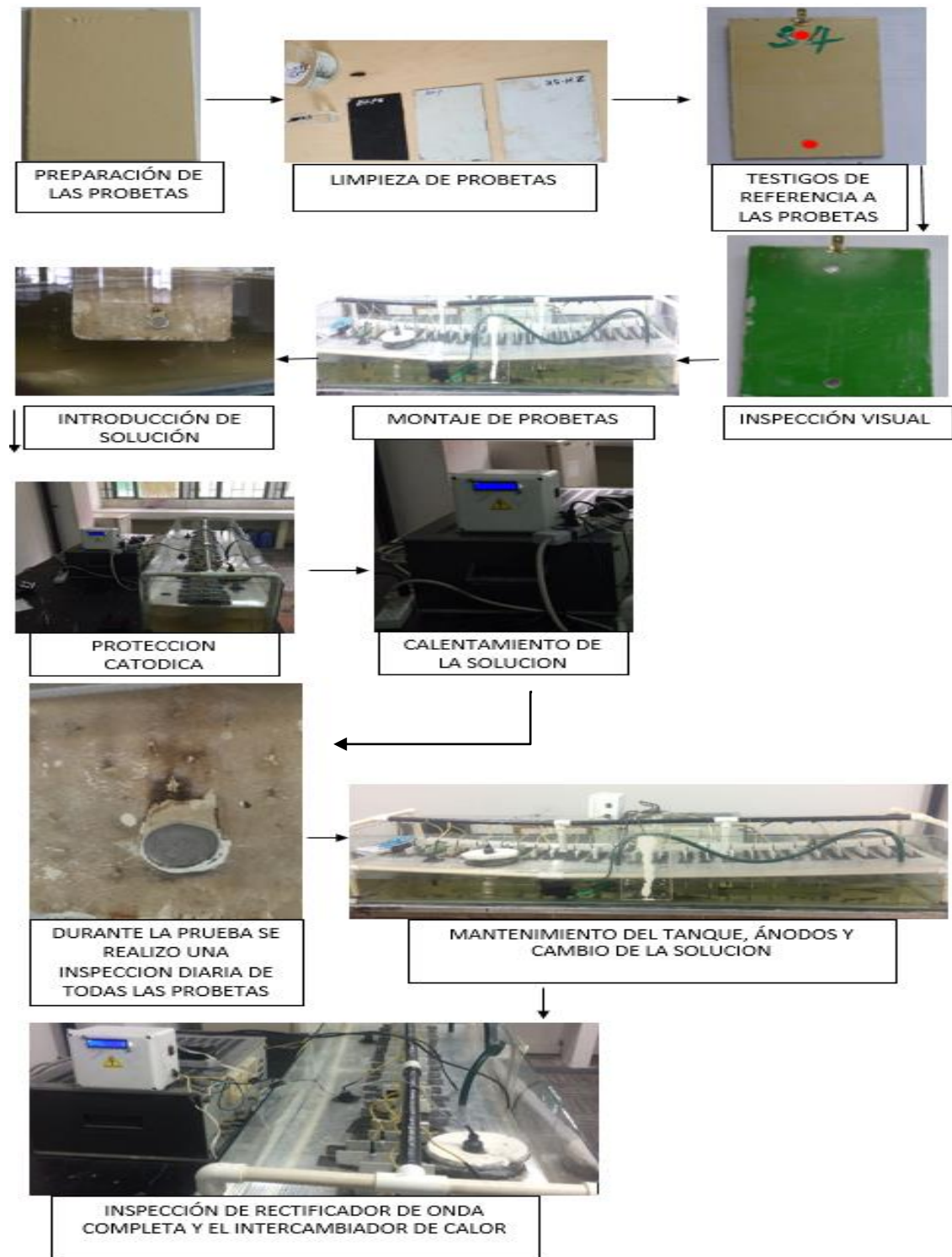


**Fuente:** Autor

#### **2.2.4. Realización de prueba cathodic disbonding (desprendimiento catódico).**

La (figura 20), resume las etapas o actividades que se deben tener presente en el momento que se requiera desarrollar del montaje de la prueba de desprendimiento catódico.

**Figura 20.** Diagrama descripción del montaje cathodic disbonding.



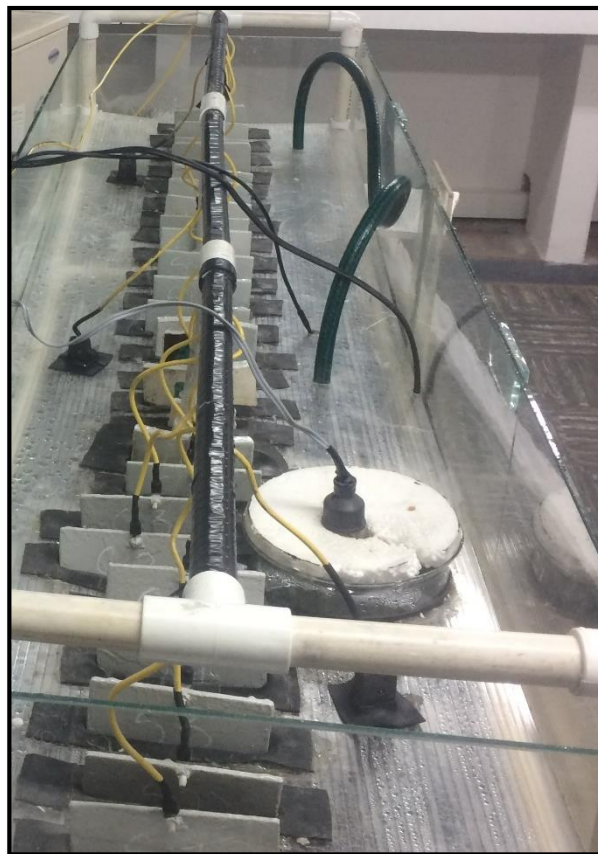
**Fuente:** Autor

**2.2.4.1. Condiciones de operación y otros sistemas.** Teniendo en cuenta, que la prueba trabaja diferentes variables, se debe realizar de forma minuciosa.

**2.2.4.2. Tiempo de prueba.** La prueba de cathodic disbonding se realizó durante el tiempo de 2000 horas consecutivas.

**2.2.4.3. Temperatura.** El sistema de calentamiento de la solución resulta ser un poco compleja por la gran cantidad de solución que se necesita para el llenado del tanque, la forma del tanque no permite que toda la solución este a la misma temperatura, las corrientes que se presentan (AC y DC) pueden ocasionar un corto circuito y la composición química de la solución es altamente corrosiva, es por estas razones que se hace necesario implementar un sistema por medio de un intercambiador de calor y una bomba llevar toda la solución a la misma temperatura ya que recircula la solución como se muestra en la (figura 21).

**Figura 21.** Sistema de calentamiento.



**Fuente:** Autor

El sistema de transferencia de calor está compuesto por un vaso precipitado de 1000 ml en su interior lleva una resistencia que calienta 950 ml de agua. Según especificaciones de la norma ASTM G8 la temperatura a la cual se debe llevar a cabo el procedimiento es de 35 °C.

**2.2.4.4. Composición del electrolito.** El electrolito está compuesto de agua destilada con la adición de 1% en masa de cada una de las siguientes sales técnicas:

- Cloruro de sodio
- Sulfato de sodio
- Carbonato de sodio

Se utilizó solución recién preparada semanalmente.

**2.2.4.5. Testigos de referencia.** Los testigos de referencia se realizaron en cada probeta con el fin de ver el desprendimiento de hidrogeno gaseoso en la parte sumergida, y percibir qué cambios tiene el recubrimiento en esta zona, y garantizar que la sobreprotección catódica se está efectuando exitosamente. Los testigos tienen un diámetro de 0,6cm y una distancia de 1.2 cm del borde de la probeta y deben ir en todo el centro, según designaciones de la norma ASTM G8 como se muestra la (figura 22).<sup>37</sup>

**2.2.4.6. Corriente impresa.** Al igual que con los ánodos de sacrificio, la protección catódica por corriente impresa requiere de un ánodo, para la prueba como se muestra en la (figura 23). Se utilizaron ánodos de grafito, el cátodo son la placas de acero 1020 y el electrolito, que puede ser terreno o agua en el caso de la norma ASTM G8 se utiliza una solución de sales, para cerrar el proceso electrolítico. Se utilizó un voltaje de 1,5 voltios y una corriente 5 amperios para cada probeta.

**2.2.4.7. Inspección visual.** En el transcurso de la prueba diariamente se realizaba una inspección visual a la parte sumergida de cada una de las probetas más exacto en la zona del testigo de referencia, con el fin de evidenciar con un registro fotográfico y un tiempo en horas la existencia de ampollas y cuarteamiento de algún recubrimiento ver (figura 24).

---

<sup>37</sup> ASTM G-8 “Standard Test Methods for Cathodic Disbonding of Pipeline Coatings”, ASTM International, 2010

**Figura 22.** Testigos de referencia.



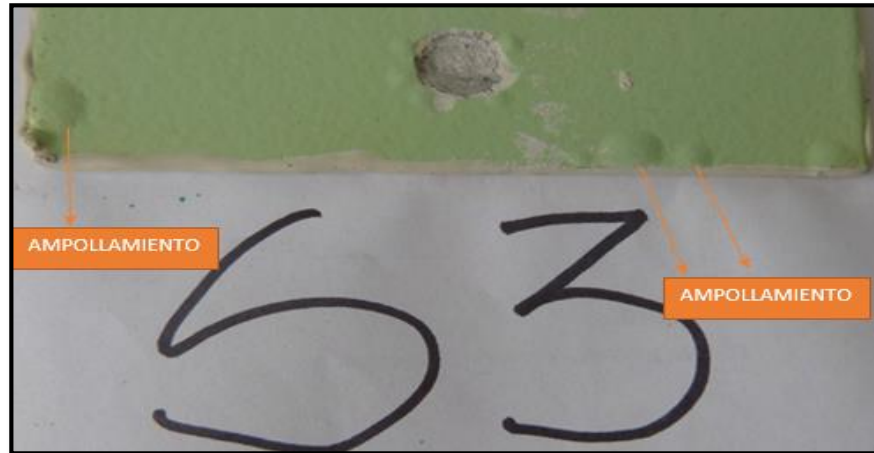
**Fuente:** Autor

**Figura 23.** Diagrama de corriente impresa.



**Fuente:** Autor

**Figura 24.** Ampolla en el recubrimiento.



**Fuente:** Autor

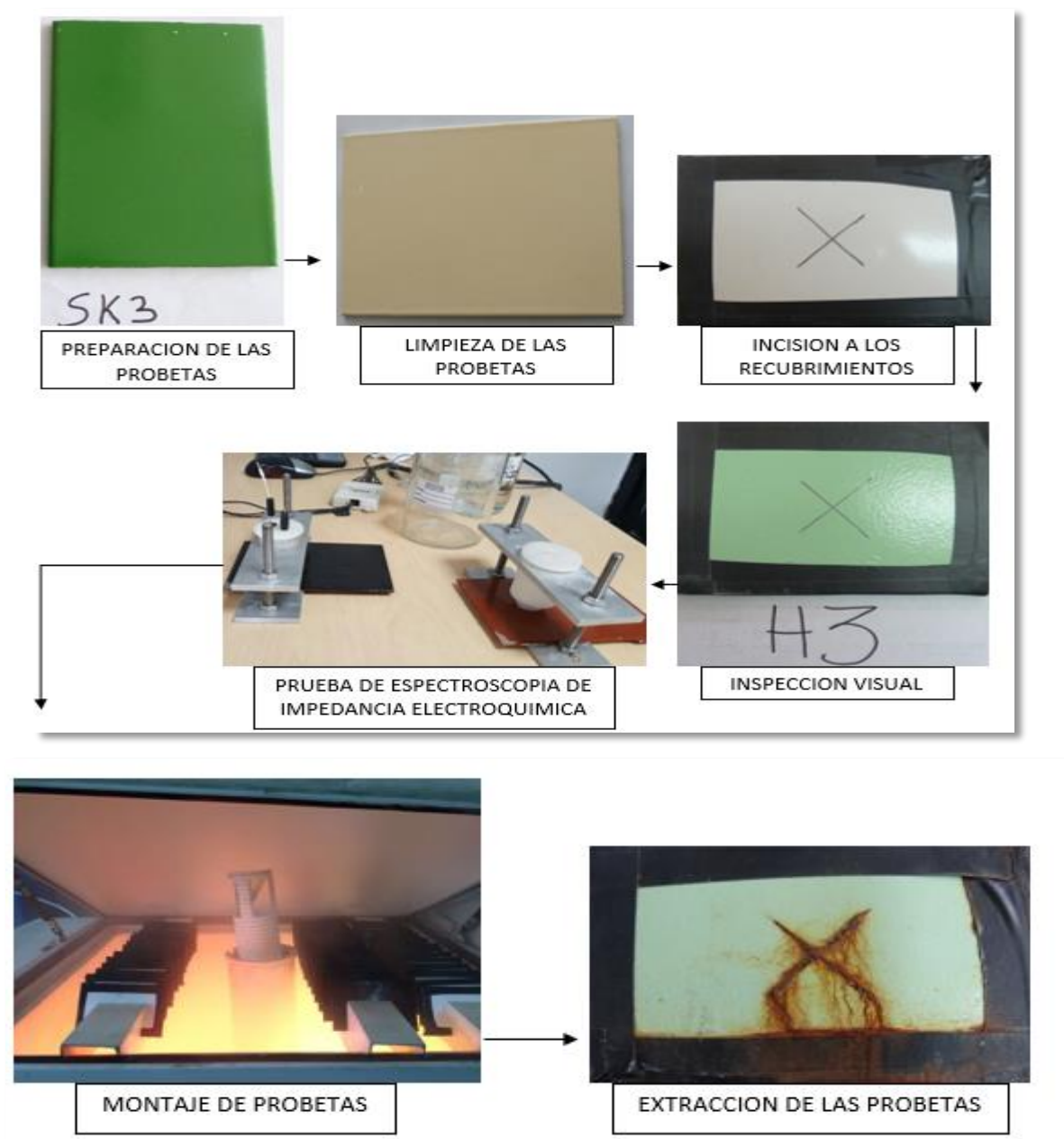
**2.2.5. Cámara de niebla salina.** Se exponen recubrimientos en un ambiente rico en cloruros simulando condiciones de deterioro acelerado, en una cámara salina, o cámara de corrosión por niebla salina, a un sistema capaz de reproducir las condiciones corrosivas existentes en ambientes ricos en cloruros; el montaje de las diferentes sistemas evaluados y su distribución dentro de la cámara, también se evidencia la formación de micro gotas suspendidas generando un ambiente de neblina.

El objetivo del ensayo acelerado de corrosión es simular en el laboratorio el comportamiento de un producto frente a la corrosión en campo. El ensayo de niebla salina consiste en exponer la pieza objeto del ensayo a una niebla salina durante cierto periodo de tiempo en el interior de la cámara, bajo condiciones controladas. El tiempo transcurrido desde que se introdujo pieza o artículo hasta que comienza el ataque de la corrosión, proporciona una medida de la capacidad de resistencia del metal constituyente o del recubrimiento a dicho ataque.

En la (figura 25), se evidencia los pasos que se llevaron a cabo para la realización de la prueba de cámara de niebla salina y espectroscopia de impedancia electroquímica.



**Figura 25.** Diagrama descripción del montaje de cámara de niebla salina y EIS.



**Fuente:** Autor

**2.2.5.1. Control de las variables y otros sistemas.** Teniendo en cuenta, que la cámara trabaja diferentes variables según especificaciones de la norma ASTM B117, se debe realizar de forma minuciosa.<sup>38</sup>

<sup>38</sup> ASTM B-117 "Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus", ASTM International.

**2.2.5.2. Tiempo de prueba.** La prueba de cámara de niebla salina se realizó durante un tiempo de 2000 horas consecutivas.

**2.2.5.3. Temperatura.** La zona de exposición de la cámara de niebla salina se mantuvo a la temperatura de 35 °C, esta temperatura fue controlada gracias a que la cámara de niebla salina cuenta con una termocupla la cual no deja que la temperatura sea mayor o menor a la establecida con ayuda de unas bombillas.

**2.2.5.4. Calidad de niebla salina.** La solución salina atomizada no incidió directamente a las probetas y la calidad de niebla será tal que la presión de atomización no deberá ser menor a 10 psi para el ensayo se utilizó una presión de 12 psi, y no debe gotear solución a las muestras ver (figura 26).

**2.2.5.5. Concentración de la solución y pH.** La concentración de NaCl que se utilizó para la prueba fue del 3% en peso, el pH de la solución se mantuvo de 6.5 a 7.2. Se usó sal analítica ya que su porcentaje de impurezas es demasiado bajo y no afecta químicamente los recubrimientos.

**Figura 26.** Niebla salina.

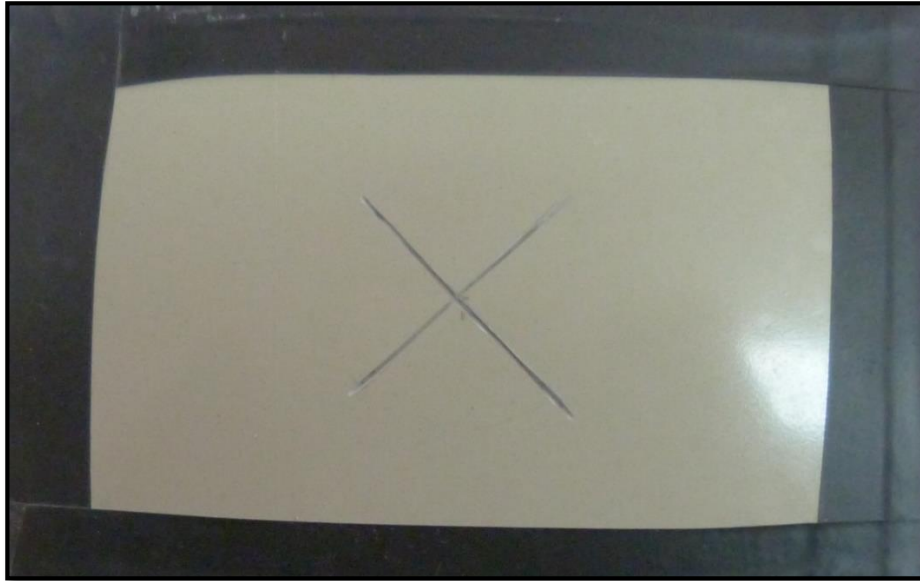


**Fuente:** Autor

**2.2.5.6. Incisión y posición de los recubrimientos.** Se elaboraron incisiones a todos los recubrimientos en forma de x con el fin de evidenciar daños en el sustrato generado por la corrosión ver (figura 27). Las probetas se colocaron en un ángulo de 30° respecto a la vertical y paralelo a la dirección principal del flujo de niebla a través de la cámara. Las probetas no están en contacto y colocadas para la exposición de la niebla.



**Figura 27.** Incisión en los recubrimientos.



**Fuente:** Autor

**2.2.5.7. Inspección visual y espectroscopia de impedancia electroquímica.** Se realizó una inspección visual y una prueba de espectroscopia de impedancia electroquímica antes de que cada probeta entrara a la cámara de niebla salina ver (figura 28), y durante su exposición a esta se realizaba en los tiempos de 500, 1000, 1500 y 2000 horas.

**Figura 28.** Prueba de espectroscopia de impedancia electroquímica.



**Fuente:** Autor

**2.2.6. Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.** Las medidas de EIS se efectuaron en equipos Potenciostat/Galvanostat/ZRA Gamry Reference 750. Se realizó un barrido de frecuencia entre 100000 y 0.1 Hz, con una amplitud de perturbación de 30 mV. En el montaje experimental se utilizó una celda de tres electrodos: Contra Electrodo de Platino, Electrodo de trabajo (Probeta con recubrimiento en la superficie), se utilizó una salmuera al 3 % NaCl y como electrodo de referencia Ag/AgCl utilizando de referencia la norma ASTM G3<sup>39</sup>.

Se determinó la impedancia por medio de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica, con el fin de establecer el comportamiento de las condiciones de resistencia de los recubrimientos, ya que provee información importante y útil para la estimación del desempeño de los recubrimientos, además la impedancia electroquímica suministra información valiosa básicamente sobre los siguientes procesos:

- Hinchamiento del recubrimiento e incorporación (difusión) de iones en el recubrimiento, y la formación intrínseca de defectos tales como poros.
- Inicio de corrosión localizada en los focos de deterioro.
- Propagación de la corrosión bajo el recubrimiento, que puede deberse a reacciones anódicas o catódicas.
- Transporte del agua o medio a través del recubrimiento.

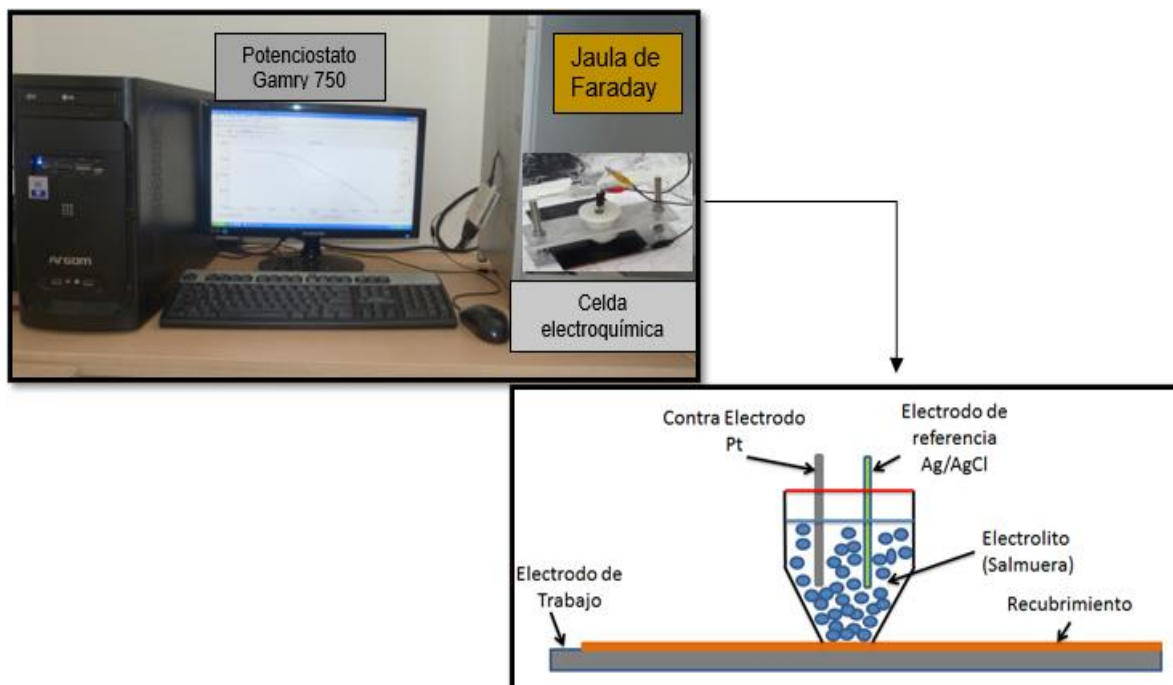
Se utilizó una jaula de Faraday para disminuir interferencias externas (ruido) al montaje y obtener una mejor calidad de las medidas. En la (figura 29), se muestra la celda utilizada y la configuración del montaje para las pruebas EIS.

Para tener una claridad mayor de los elementos que conforman el circuito equivalente se puede asociar a cada elemento un fenómeno físico que está pasando en el sistema sustrato/recubrimiento en contacto con una solución de trabajo. Como se observa en la (figura 30),  $R_c$  se denomina como una resistencia de poro o del recubrimiento, siendo el valor más alto el que se registra en los resultados.

---

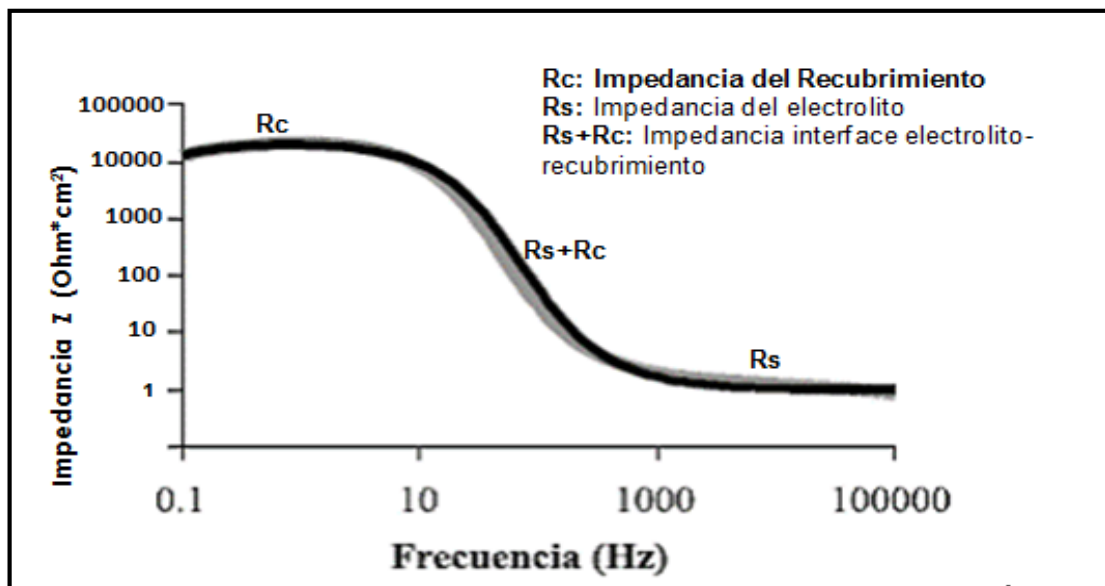
<sup>39</sup> ASTM G-3 "Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing", ASTM International.

**Figura 29.** Montaje para realización de pruebas de impedancia.



**Fuente:** Autor

**Figura 30.** Diagrama de bode.



**Fuente:** Manual EIS

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1. CATHODIC DISBONDING (DESPRENDIMIENTO CATÓDICO).

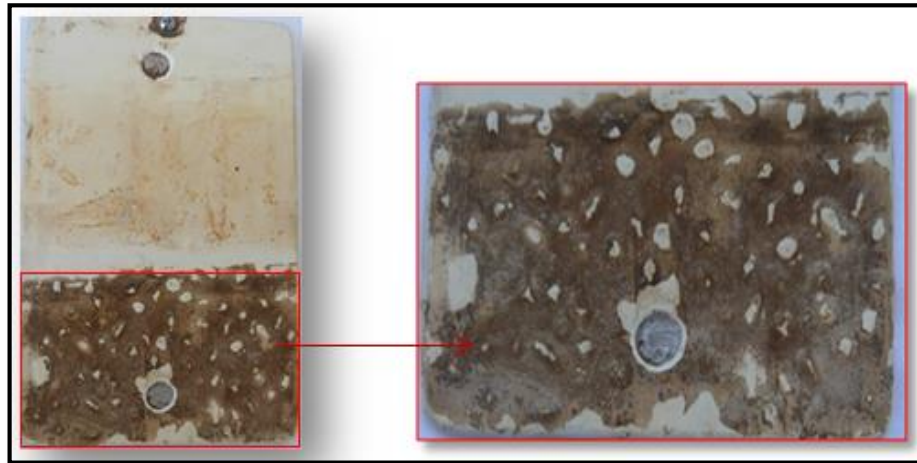
La prueba de cathodic disbonding, busca determinar la resistencia al desprendimiento en los diferentes sistemas de recubrimientos anticorrosivos, aplicados sobre la superficie exterior de tuberías de acero enterradas, considerando además la aplicación de protección catódica. Se tienen en cuenta, algunos inconvenientes presentados durante la elaboración de las pruebas, el tipo de preparación superficial aplicada por el proveedor y los requerimientos de corriente; para determinar cuál de los recubrimientos resiste mejor al desprendimiento catódico.

Como ya se indicó inicialmente, para evitar de alguna manera la corrosión de las estructuras metálicas, se usan sistemas duales de protección. Estos sistemas tienen como inconveniente, que a potenciales muy negativos, (es decir menores a  $-1500$  mV), se sobreprotege el material debido al exceso de electricidad, por tanto, afecta de manera muy considerable al recubrimiento de la pintura, debido a que ocurre una reacción catódica de reducción de hidrógeno gaseoso en la superficie (formación y desprendimiento de  $H_2$ ), que se manifiesta con un ampollamiento en la pintura, estos valores, dependen de la resistencia que tenga el recubrimiento al desprendimiento catódico, para tomar el registro de este potencial negativo se mide con respecto a un electrodo de referencia de Cobre sulfato de Cobre.

A continuación se muestra los resultados de cathodic disbonding según su sistema:

- Recubrimiento **P4** registra un tiempo de ampollamiento de 286 horas, no presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 31).

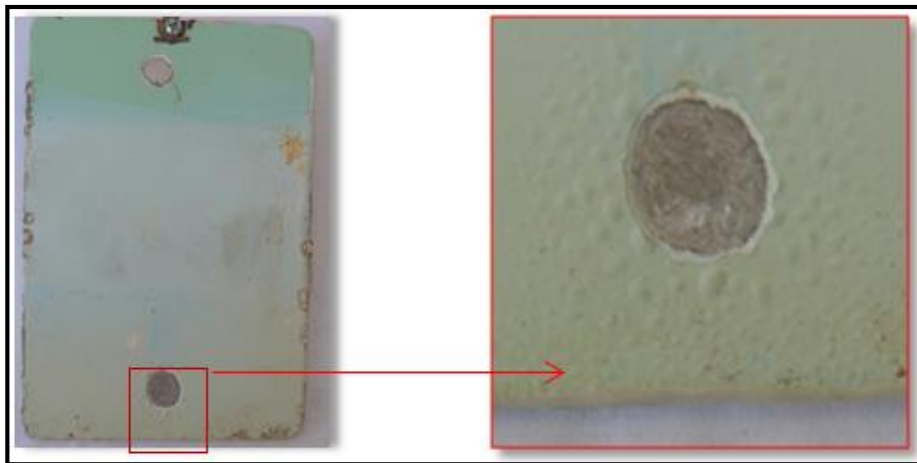
**Figura 31. Recubrimiento P4.**



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **P3** registra un tiempo de ampollamiento de 356 horas, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 32).

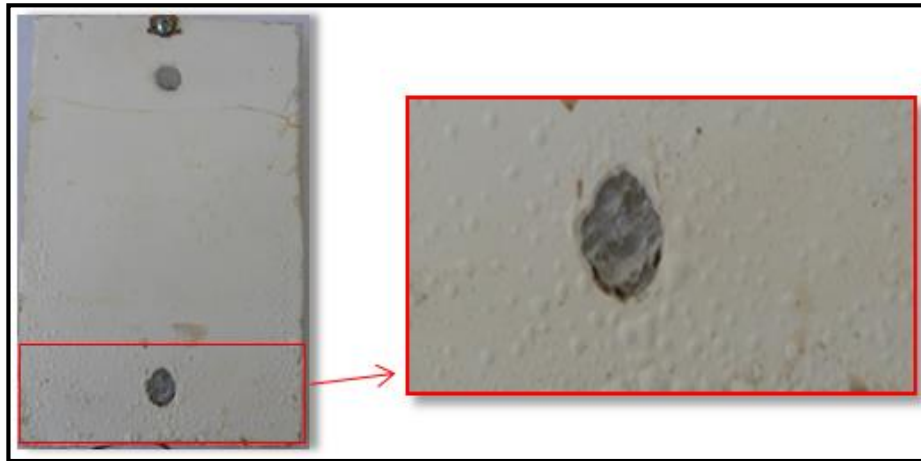
**Figura 32. Recubrimiento P3.**



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **P2** registra un tiempo de ampollamiento de 378 horas, presenta cambios en su tono de brillo ver (figura 33).

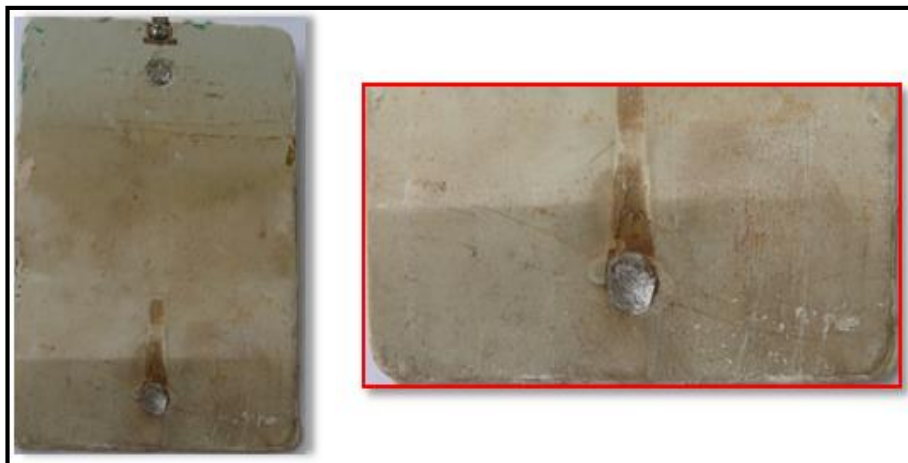
**Figura 33. Recubrimiento P2.**



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **P1** no registra un tiempo de ampollamiento en el transcurso de la prueba, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 34).

**Figura 34. Recubrimiento P1.**



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **C4** no registra un tiempo de ampollamiento en el transcurso de la prueba, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 35).

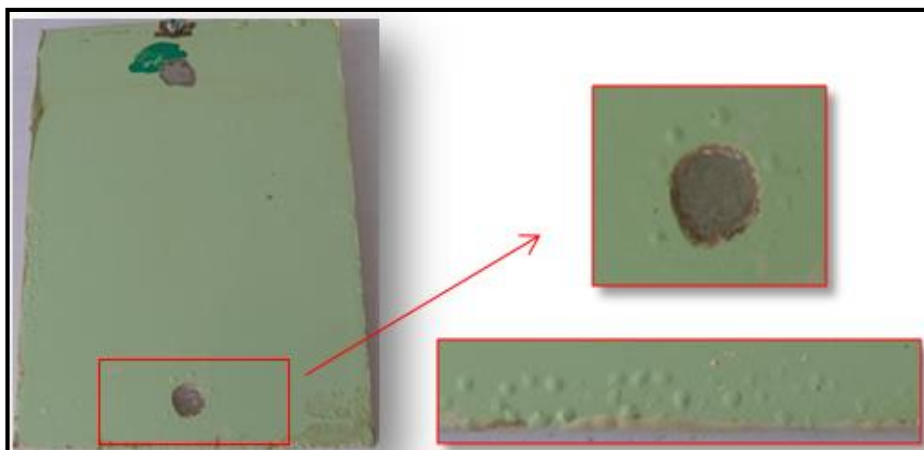
**Figura 35. Recubrimiento C4.**



. **Fuente:** Autor

- Recubrimiento **C3** registra un tiempo de ampollamiento de 578 horas, no presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 36).

**Figura 36. Recubrimiento C3.**

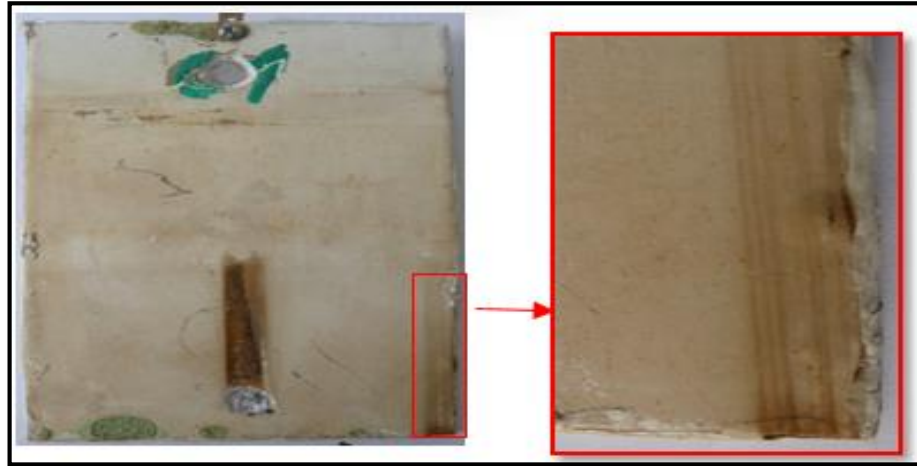


. **Fuente:** Autor

- Recubrimiento **C2** registra un tiempo de ampollamiento de 670 horas y cuarteamiento en estas, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 37).



**Figura 37. Recubrimiento C2.**



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **C1** registra un tiempo de ampollamiento de 520 horas, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 38).

**Figura 38. Recubrimiento C1.**

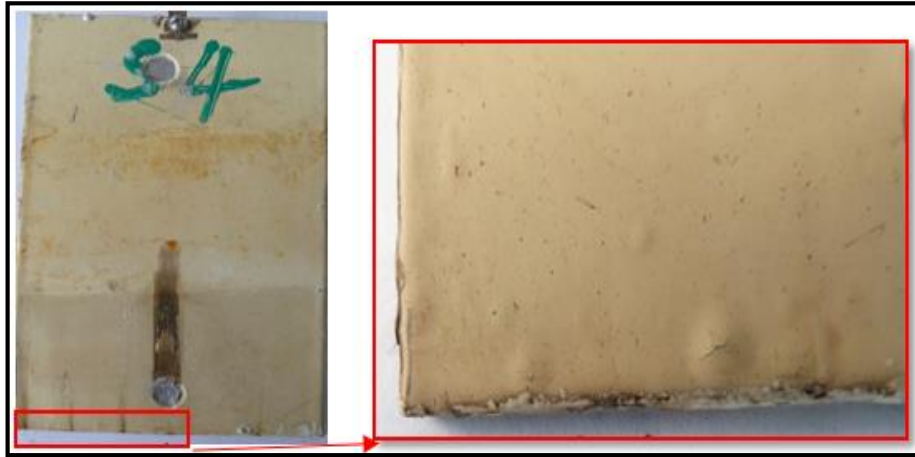


**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **S4** registra un tiempo de ampollamiento de 850 horas y cuarteamiento en estas3, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 39).



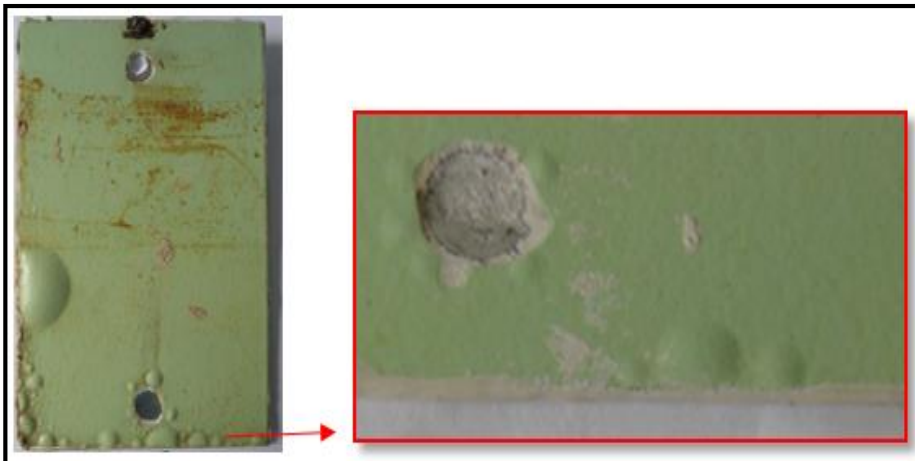
**Figura 39.** Recubrimiento **S4**.



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **S3** registra un tiempo de ampollamiento de 456 horas, no presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 40).

**Figura 40.** Recubrimiento **S3**.



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **S2** registra un tiempo de ampollamiento de 656 horas, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 41).

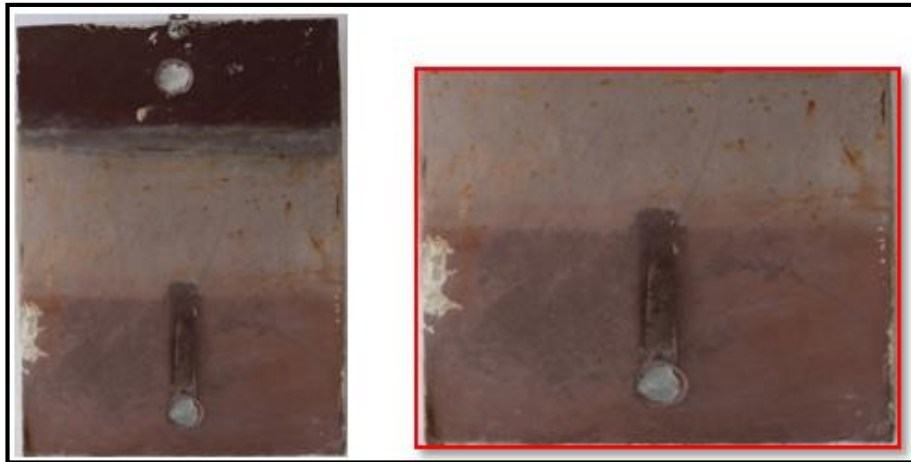
**Figura 41. Recubrimiento S2.**



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **S1** no registra un tiempo de ampollamiento en el transcurso de la prueba, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 42).

**Figura 42. Recubrimiento S1.**



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **H4** registra un tiempo de ampollamiento de 1264 horas, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 43).

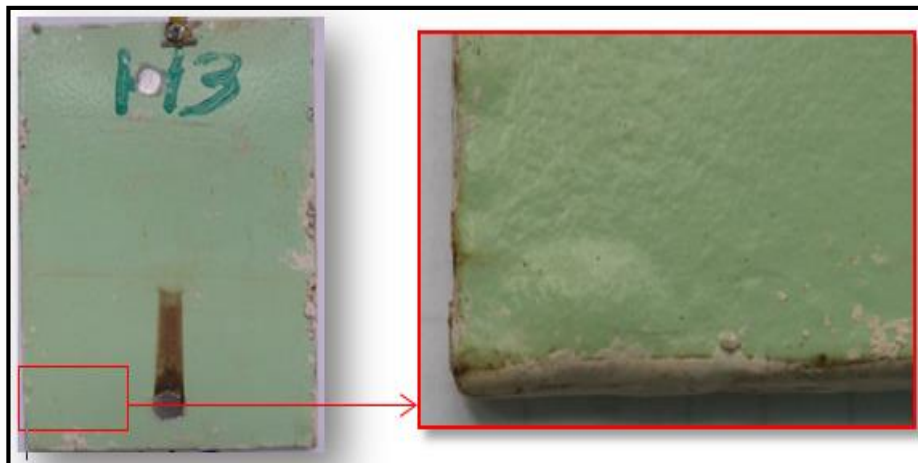
**Figura 43. Recubrimiento H4.**



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **H3** registra un tiempo de ampollamiento de 816 horas, no presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 44).

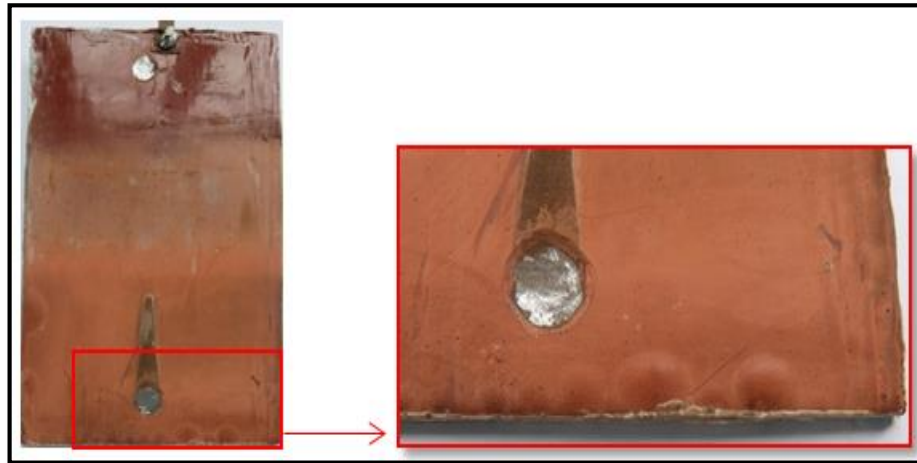
**Figura 44. Recubrimiento H3.**



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **HJ** registra un tiempo de ampollamiento de 1052 horas, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 45).

**Figura 45. Recubrimiento HJ.**



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **H1** registra un tiempo de ampollamiento de 726 horas, presenta cambios en su tono de color y brillo (ver figura 46).

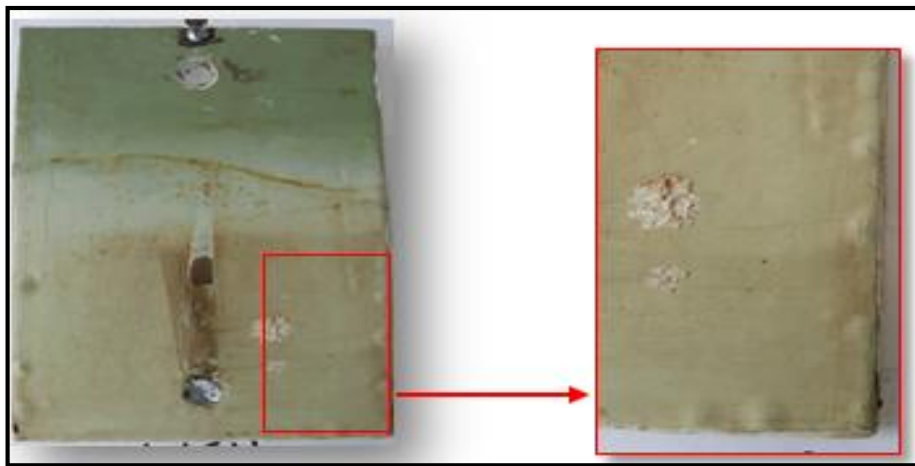
**Figura 46. Recubrimiento H1.**



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **SK4** registra un tiempo de ampollamiento de 1625 horas, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 47).

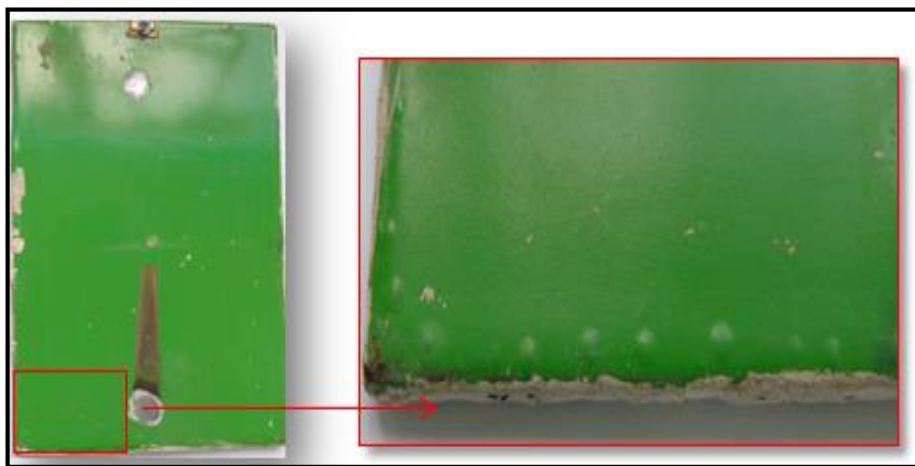
**Figura 47.** Recubrimiento **SK4**.



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **SK3** registra un tiempo de ampollamiento de 1854 horas, no presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 48).

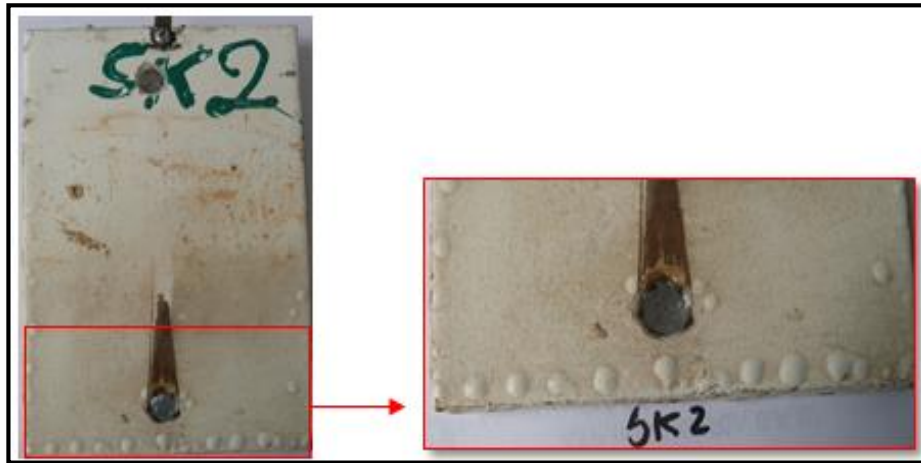
**Figura 48.** Recubrimiento **SK3**



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **SK2** registra un tiempo de ampollamiento de 1725 horas, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 49).

**Figura 49.** Recubrimiento **SK2**.



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **SK1** no registra un tiempo de ampollamiento en el transcurso de la prueba, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 50).

**Figura 50.** Recubrimiento **SK1**.



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **P5-C** registra un tiempo de ampollamiento de 1305 horas, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 51).

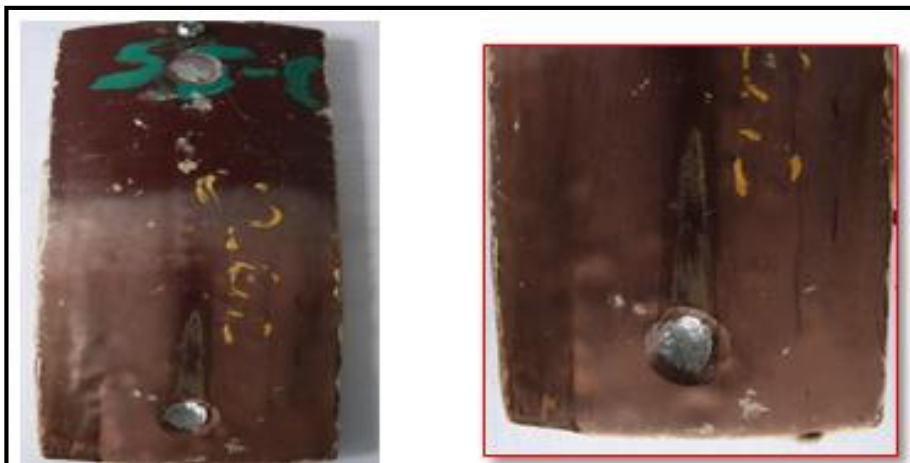
**Figura 51.** Recubrimiento **P5-C**.



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **S5-C** no registra un tiempo de ampollamiento en el transcurso de la prueba, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 52).

**Figura 52.** Recubrimiento **S5-C**.



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **C5-C** no registra un tiempo de ampollamiento en el transcurso de la prueba, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 53).



**Figura 53.** Recubrimiento **C5-C**.



**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **H5-C** no registra un tiempo de ampollamiento en el transcurso de la prueba, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 54).

**Figura 54.** Recubrimiento **H5-C**.

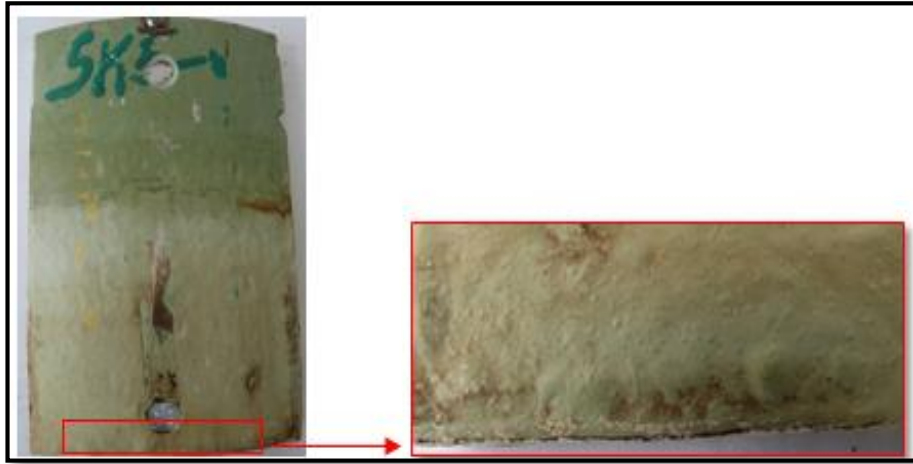


**Fuente:** Autor

- Recubrimiento **SK5-C** registra un tiempo de ampollamiento de 1570 horas, presenta cambios en su tono de color y brillo ver (figura 55).



**Figura 55.** Recubrimiento SK5-C.

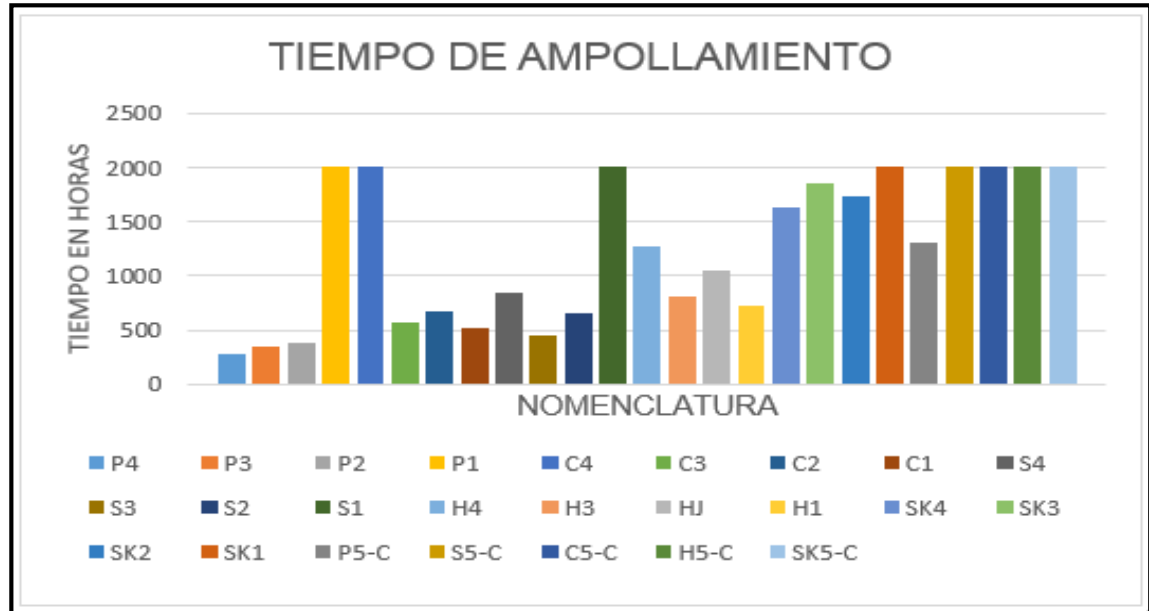


**Fuente:** Autor

Se realizó una inspección visual continua para evidenciar la presencia de ampollas en los recubrimientos, logrando detectar cualquier cambio en la superficie de los mismos, como se muestra en algunas probetas, se pudo observar algunos indicios de desprendimiento catódico, se evidenció que la pintura estaba ligeramente levantada. Asimismo, en otros casos, se observaron probetas que no sufrieron efectos después de haber terminado el período del ensayo. De acuerdo a los resultados obtenidos se consolidan para evidenciarlos en la (gráfica 1), donde se muestra cada uno de los recubrimientos y el tiempo de ampollamiento, los recubrimientos que no ampollaron durante la prueba se les establece en la gráfica como el tiempo de ensayo 2000 horas, siendo en este caso el sistema **SK**, en el presenta menos posibilidad de generar algún tipo de ampollamiento producto de la combinación de dos sistemas de control de la corrosión y en el cual uno puede afectar al otro por exceso de carga. Como segundo sistema que mejor se comportó a las condiciones evaluadas encontramos que el sistema con la denominación **H** con un alto registró en su tiempo de ampollamiento.

El ampollamiento y cuarteamiento generado en los recubrimientos durante la prueba, se debe a que el hidrogeno ejerce una presión entre la interface recubrimiento/metal. Es tanta la presión que el recubrimiento pasa su límite elástico y llega al plástico y es en ese momento en el que el recubrimiento genera cuarteamiento.

**Grafica 1.** Tiempo de ampollamiento.



**Fuente:** Autor

### 3.2. EVALUACIÓN EN CÁMARA DE NIEBLA SALINA.

Los diferentes sistemas se sometieron en un periodo de tiempo de 2000 horas, permitiendo que las condiciones de temperatura (35 °C), humedad y contenido de cloruros generaran algún tipo de deterioro en la superficie del recubrimiento, evaluando este comportamiento desde las 0 horas e intervalos de 500 horas de exposición hasta completar el tiempo total, para ser analizados por medio de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.

### 3.3. EVALUACIÓN POR MEDIO DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA.

De impedancia se podría tener una clasificación de varios tipos de recubrimientos gracias a que la resistencia eléctrica que podemos obtener de las medidas, nos puede servir como un indicador de comportamiento. Recubrimientos que tengan valores de resistencia superiores a  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$  se pueden clasificar como de excelente protección, mientras que aquellos que tengan valores por debajo de  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$  se predice que disminuyen su característica protectora. El diagrama que

permite visualizar mejor el comportamiento de los recubrimientos cuando se exponen a ensayos acelerados es el **DIAGRAMA DE BODE**.

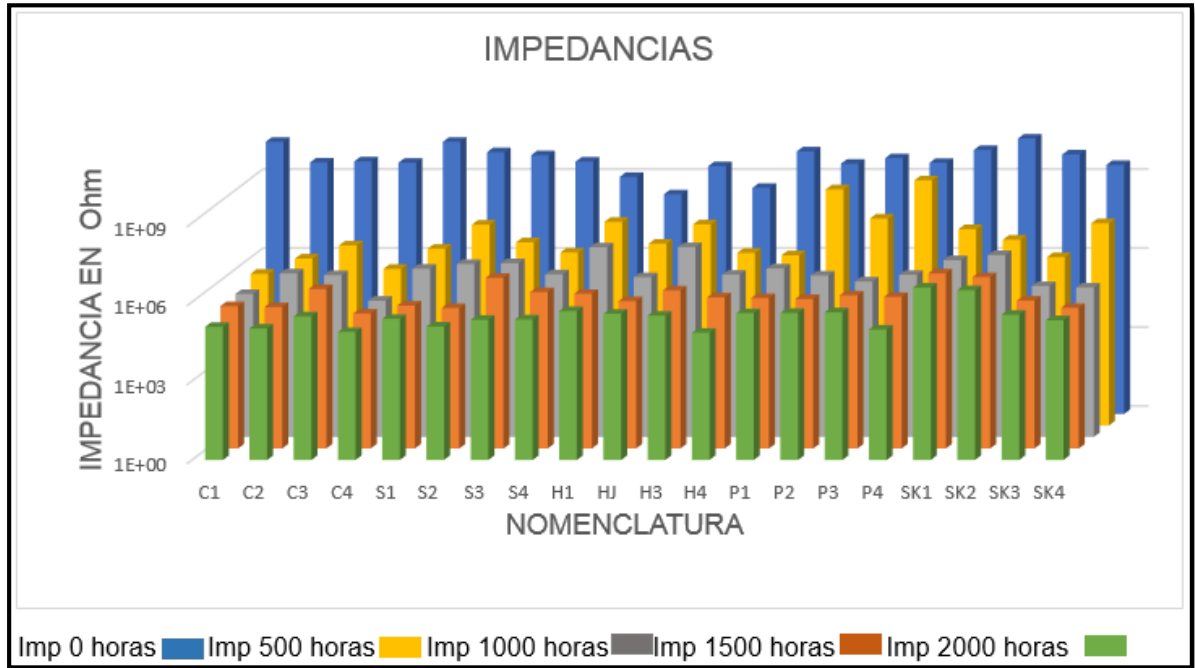
La (tabla 2) presenta los resultados de la evaluación electroquímica usando una solución de cloruro de sodio, los cuales se obtuvieron de realizar las pruebas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica. En la (gráfica 2), se observa el comportamiento de los valores de impedancias obtenidos.

**Tabla 2.** Impedancia de los recubrimientos.

N°	Nomenclatura	Imp (ohm) 0 horas	Imp (ohm) 500 horas	Imp (ohm) 1000 horas	Imp (ohm) 1500 horas	Imp (ohm) 2000 horas
1	<b>C1</b>	2,17E+10	5,78E+05	2,72E+05	2,54E+05	1,14E+05
2	<b>C2</b>	3,59E+09	2,19E+06	1,64E+06	2,35E+05	9,92E+04
3	<b>C3</b>	3,97E+09	6,91E+06	1,40E+06	1,15E+06	2,88E+05
4	<b>C4</b>	3,50E+09	8,92E+05	1,50E+05	1,34E+05	7,23E+04
5	<b>S1</b>	2,17E+10	5,18E+06	2,48E+06	2,66E+05	2,29E+05
6	<b>S2</b>	8,74E+09	4,24E+07	3,73E+06	2,15E+05	1,17E+05
7	<b>S3</b>	6,73E+09	9,09E+06	4,02E+06	3,04E+06	2,12E+05
8	<b>S4</b>	3,87E+09	3,71E+06	1,51E+06	8,70E+05	2,18E+05
9	<b>H1</b>	1,01E+09	5,45E+07	1,61E+07	7,59E+05	4,55E+05
10	<b>HJ</b>	2,21E+08	8,12E+06	1,18E+06	3,95E+05	3,56E+05
11	<b>H3</b>	2,60E+09	4,38E+07	1,64E+07	1,01E+06	3,05E+05
12	<b>H4</b>	3,90E+08	3,60E+06	1,47E+06	5,50E+05	6,86E+04
13	<b>P1</b>	9,39E+09	2,91E+06	2,51E+06	5,19E+05	3,76E+05
14	<b>P2</b>	3,21E+09	9,29E+08	1,35E+06	4,81E+05	3,86E+05
15	<b>P3</b>	5,20E+09	7,25E+07	8,09E+05	6,56E+05	4,06E+05
16	<b>P4</b>	3,47E+09	2,06E+09	1,44E+06	5,71E+05	9,02E+04
17	<b>SK1</b>	1,06E+10	2,89E+07	5,23E+06	4,48E+06	3,56E+06
18	<b>SK2</b>	2,90E+10	1,15E+07	8,08E+06	3,25E+06	2,82E+06
19	<b>SK3</b>	7,19E+09	2,50E+06	5,43E+05	4,16E+05	3,31E+05
20	<b>SK4</b>	2,88E+09	4,82E+07	4,80E+05	2,18E+05	2,04E+05

**Fuente:** Autor

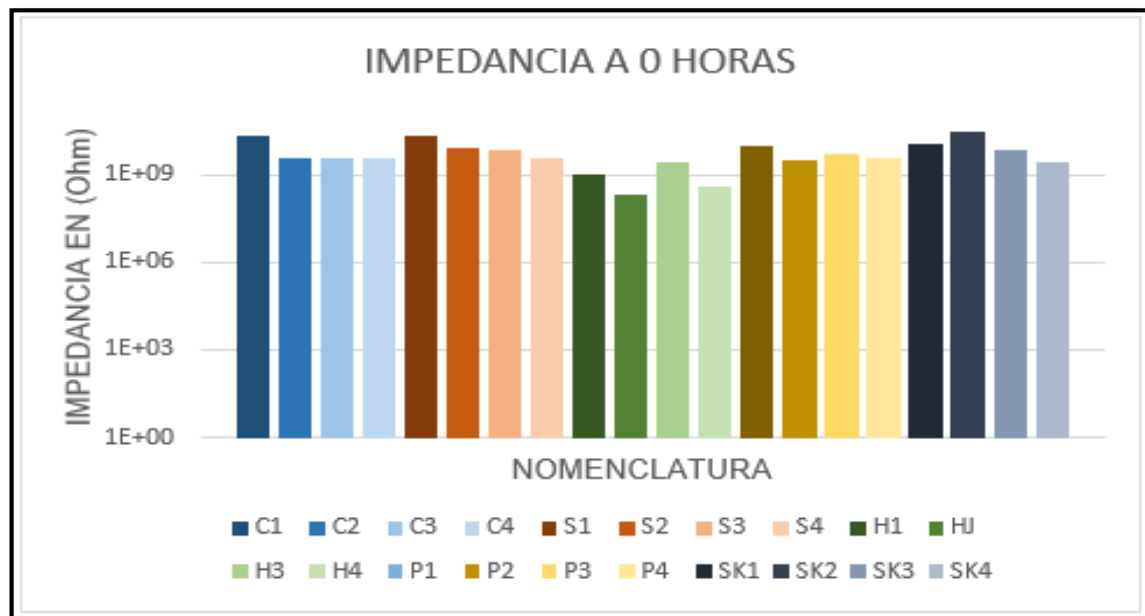
**Grafica 2.** Comportamiento de los recubrimientos.



**Fuente:** Autor

**3.3.1. Impedancia a 0 horas de exposición.** Como se puede observar en la tabla 4, los resultados de impedancia obtenidos en las pruebas iniciales que se realizaron sin ser expuesto los recubrimientos a agentes que puedan ocasionar deterioro de los recubrimientos, en general la mayoría de las muestras evaluadas presentaron resultados que se encuentran por encima de  $10^9$  Ohm.cm<sup>2</sup>, siendo estos recubrimientos que presenta buena resistencia al poro. Sin embargo se evidencia que los recubrimientos **HJ**, **H4** presentan valores levemente por debajo de los Giga ohmios, y los recubrimientos que presentan mejor resistencia al poro son el **C1**, **S1** y **SK2** como se observa en la (gráfica 3).

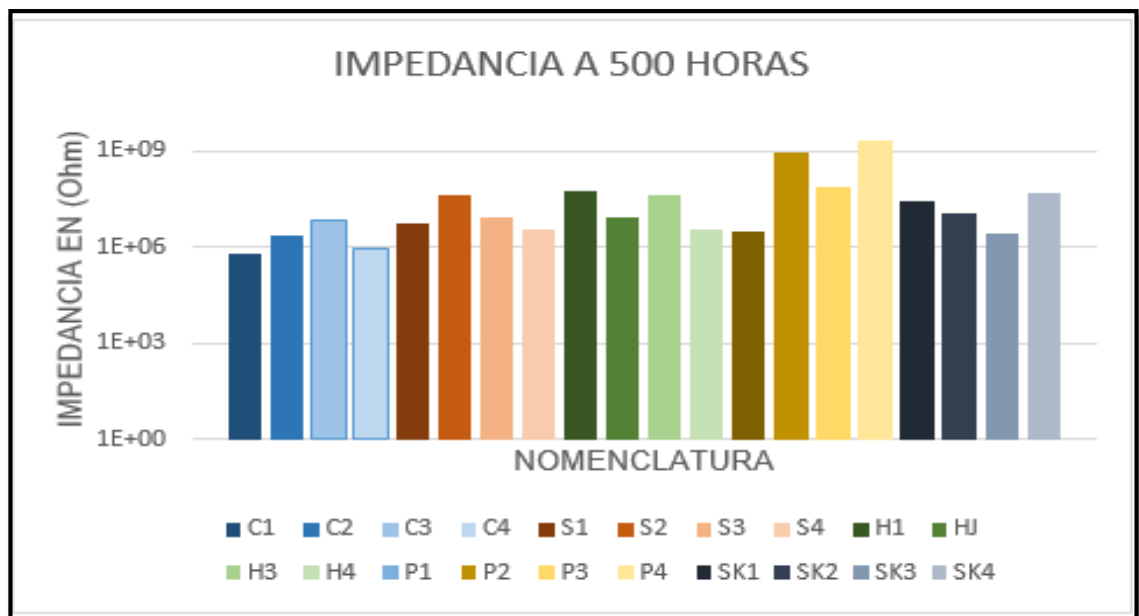
**Grafica 3.** Impedancia a 0 horas de exposición



**Fuente:** Autor

**3.3.2. Impedancia a 500 horas de exposición.** Se evidencia en los resultados obtenidos durante las pruebas a las 500 horas, demuestran que los recubrimiento, presentan resultados que se encuentran alrededor de  $10^6$  Ohm.cm<sup>2</sup>, siendo este valor en donde hay probabilidad de formarse poros y permitir que el fluido entre en contacto con la superficie del sustrato, ocasionando transferencias de cargas, Como el sistema que mejor se comporta después de haber sido sometido por un periodo de 500 horas es el sistema **P** con los recubrimientos **P2** y **P4**, los cuales mantienen un comportamiento capacitivo, para disminuir la transferencia de carga como se observa en la (gráfica 4).

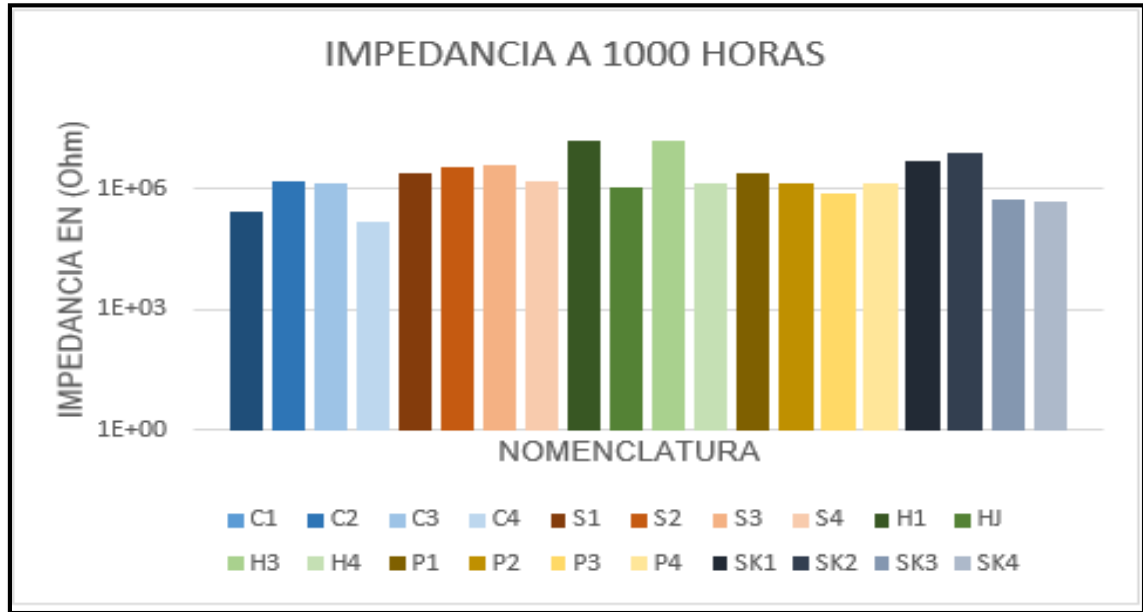
**Grafica 4.** Impedancia a 500 horas de exposición



**Fuente:** Autor

**3.3.3. Impedancia a 1000 horas de exposición.** La resistencia al poro del recubrimiento para las pruebas a las 1000 horas de exposición mantienen el rango de los mega ohmios, el sistema que mejor se comporta es el denominado como **H** con los recubrimientos **H1** y **H3**, conservando el mismo comportamiento siendo el sistemas **SK** con los recubrimientos **SK1** y **SK2**, pero en un tercer lugar encontramos el sistema **S** con los recubrimientos **S1**, **S2** y **S3** como se observa en la (gráfica 5).

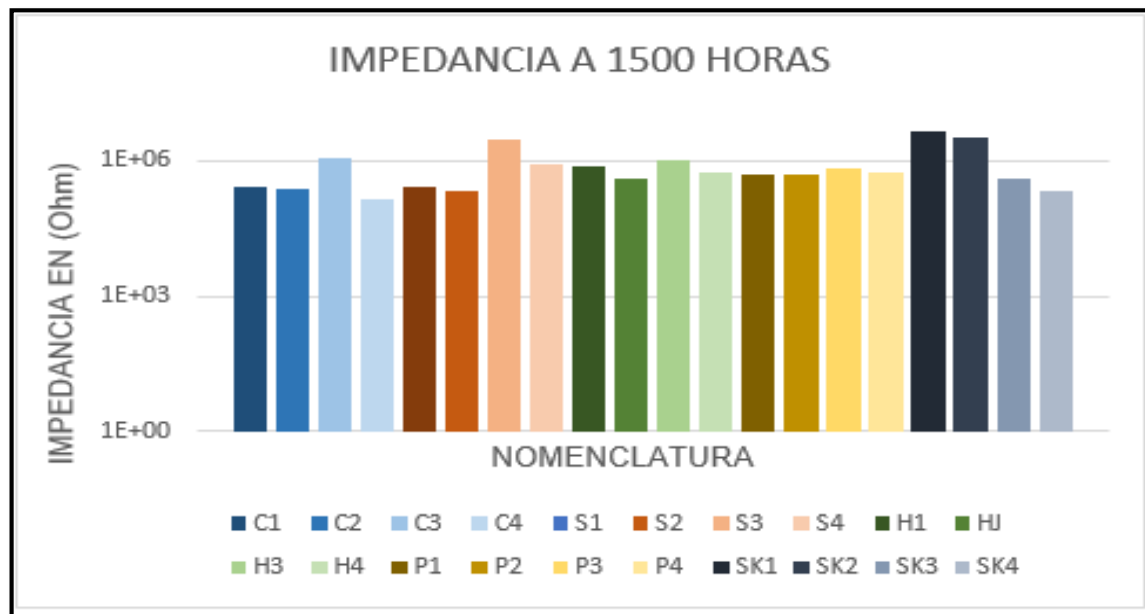
**Grafica 5.** Impedancia a 1000 horas de exposición.



**Fuente:** Autor

**3.3.4. Impedancia a 1500 horas de exposición.** Los recubrimientos que presentan valores más bajos de impedancia, son los que hacen parte del sistema **C**, siendo los denominados como, **C1**, **C2** y **C4**, los más críticos encontrados; ya que luego de cumplir las 1500 horas, y una vez realizadas las pruebas de impedancia se obtienen valores por debajo de  $10^6$  Ohm.cm<sup>2</sup> (Mega-ohmios), los cuales se caracterizan por tener una propiedad protectora muy leve frente a la acción de agentes externos que puedan deteriorar el sustrato, como se demuestra se aproxima a valores obtenidos de un acero descubierto, el sistema que mejor se comportó fue el **SK** con los recubrimientos **SK1** y **SK2**, y con el mismo comportamiento el sistema **S** con el recubrimiento **S3** como se observa en la (gráfica 6).

**Grafica 6.** Impedancia a 1500 horas de exposición.

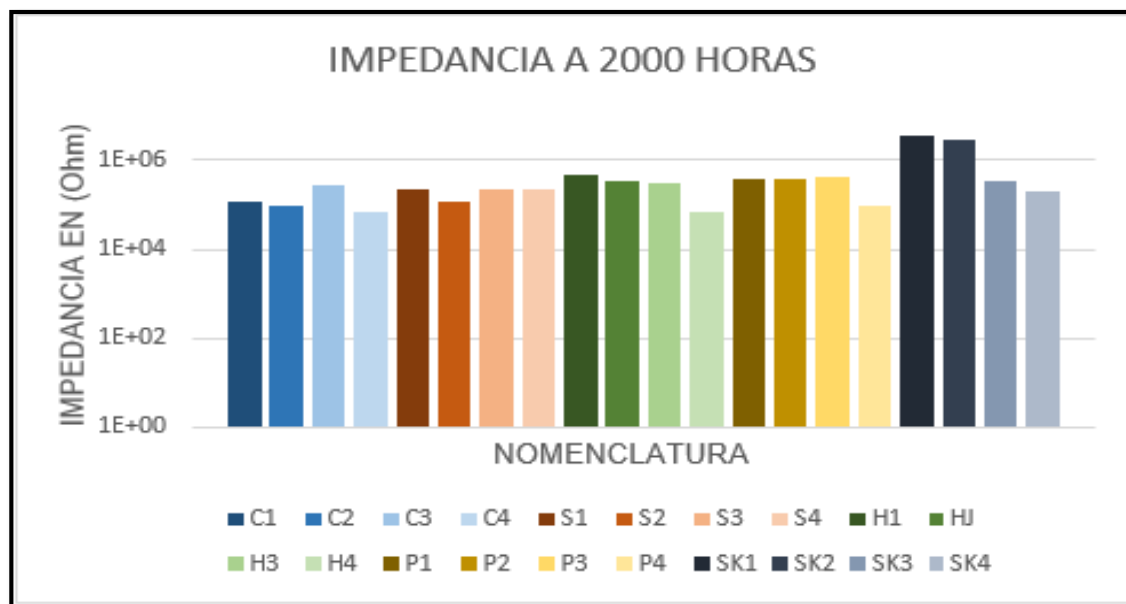


**Fuente:** Autor

**3.3.5. Impedancia a 2000 horas de exposición.** Después de las 2000 horas se observa que el recubrimiento que presenta características protectoras por encima de los demás es el sistema **SK**, manteniendo los valores de impedancia en rangos de Mega-Ohmios sin embargo los recubrimientos del sistema, presentan valores superiores en relación a los demás recubrimientos evaluados, en este sistema se obtienen mejores resultados en los recubrimientos **SK1** como la que mantiene su característica protectora por encima de los demás recubrimientos, seguida por la **SK2**, y como segundo se encuentran dos sistemas el **H** y **P** como se muestra en la (gráfica 7).



**Grafica 7.** Impedancia a 2000 horas de exposición.

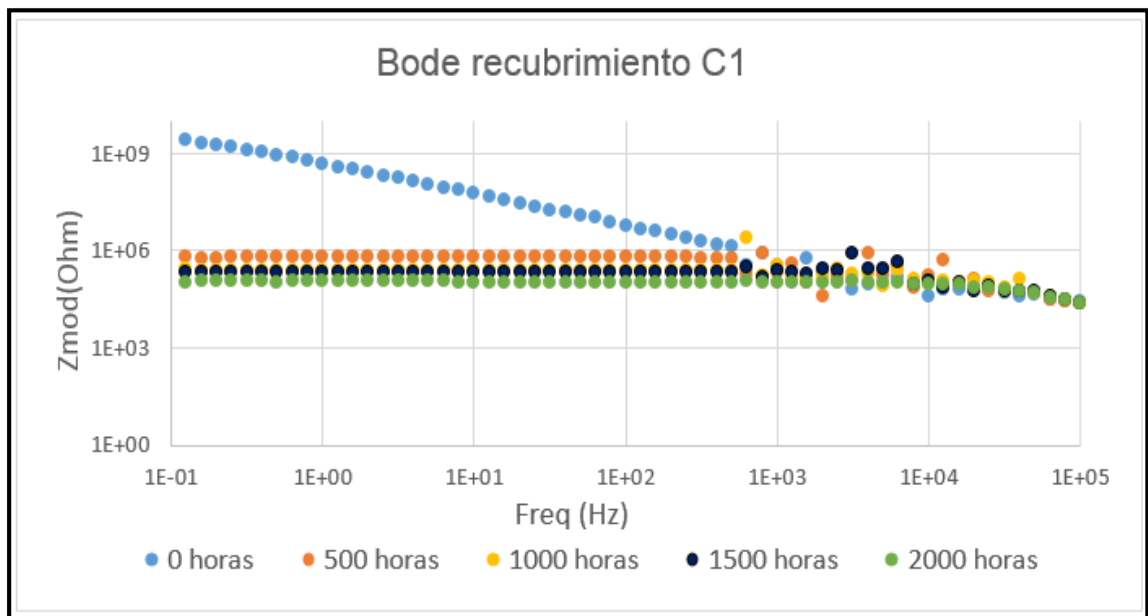


**Fuente:** Autor

**3.3.7. Grafica de bode.** Diagrama de bode se puede evidenciar el comportamiento de los recubrimiento y la resistencia al poro, cuándo son sometidos a un ambiente agresivo ricos en cloruros, en el tiempo de 2000 horas y realizando espectroscopia de impedancia electroquímica cada 500 horas.

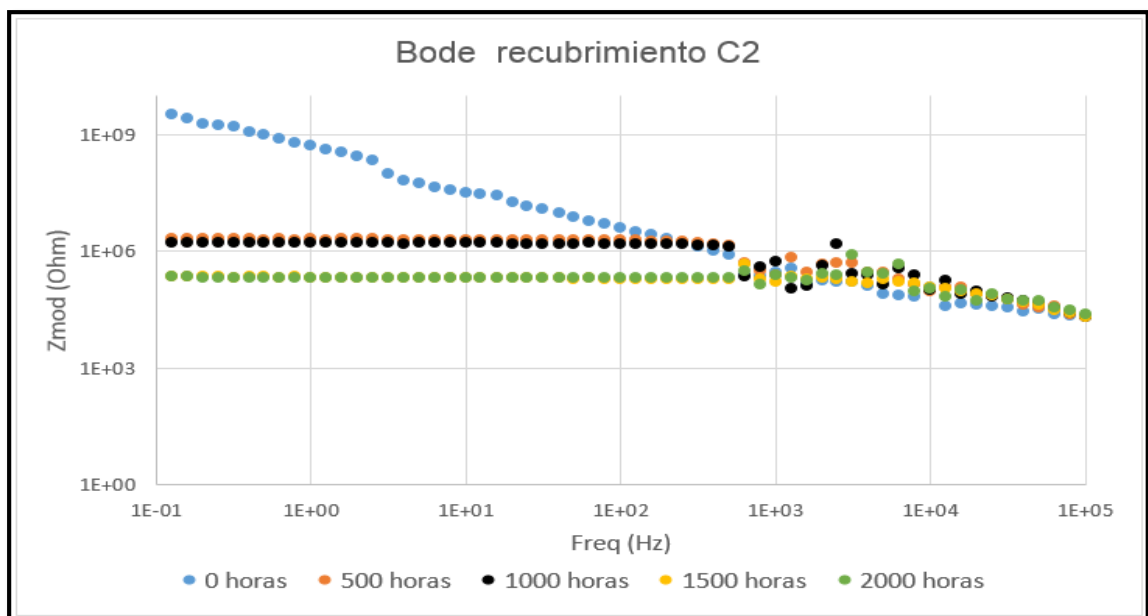
- El sistema **C** con los recubrimientos **C1**, **C2**, **C3** y **C4**, muestra en la gráfica de bode un comportamiento capacitivo, antes de ingresar a la cámara de niebla salina, y una caída óhmica considerable en el transcurso de las primeras 500 horas de prueba, posteriormente este comportamiento se evidencia que a las 1500 horas restantes del ensayo los recubrimientos siguen un comportamiento resistivo, ya que se estabilizan en el diagrama de bode y su resistencia al poro no presenta caídas considerables, como se muestra en las gráficas (8, 9, 10,11).

**Grafica 8.** Bode recubrimiento C1.



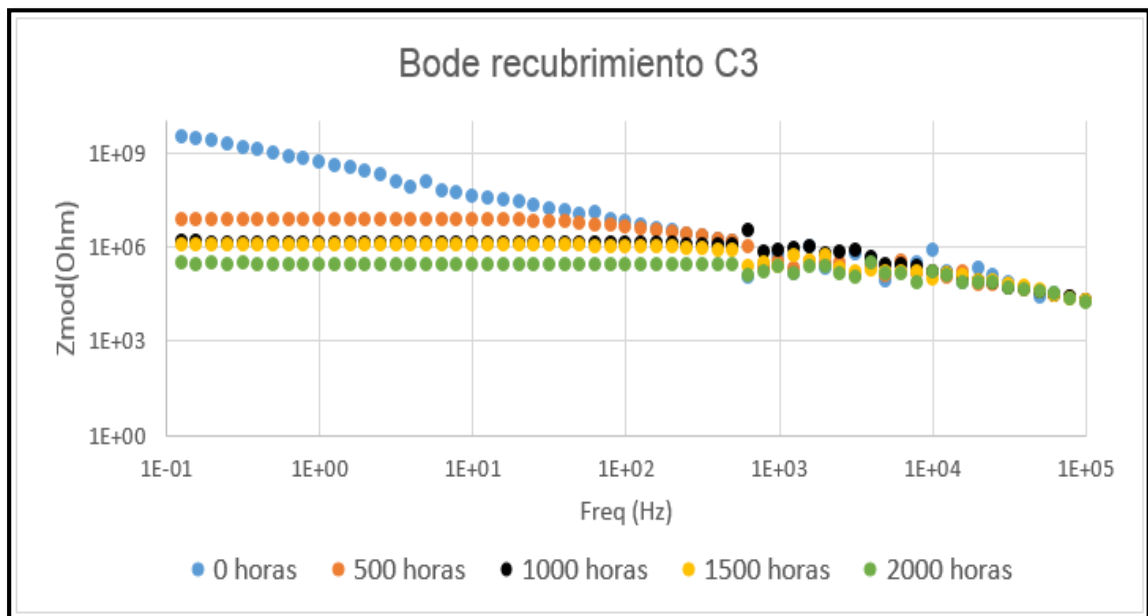
**Fuente:** Autor

**Grafica 9.** Bode recubrimiento C2.



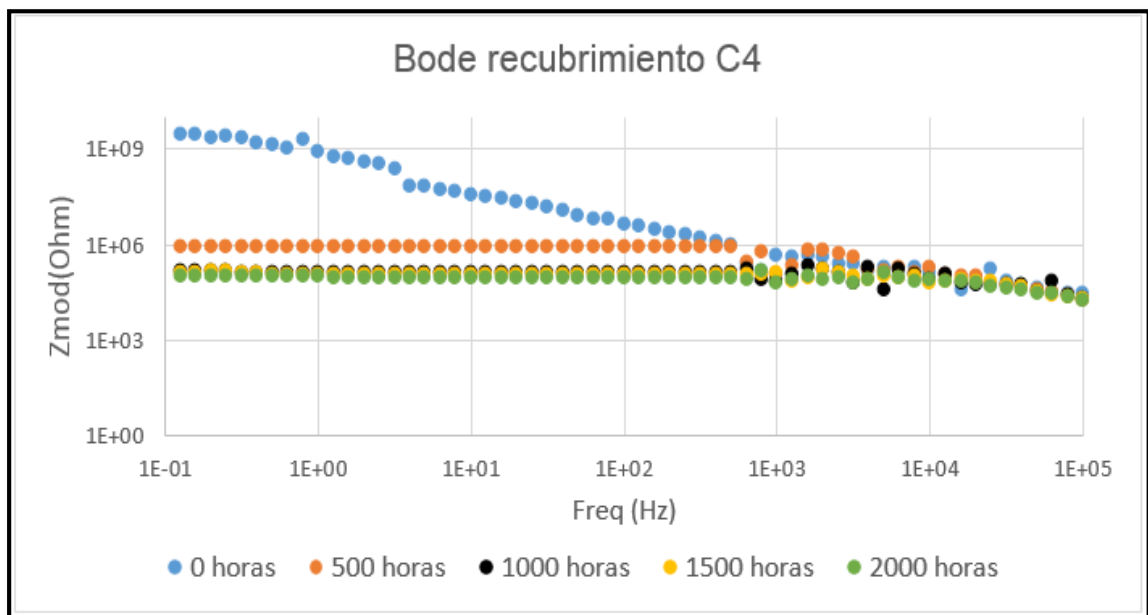
**Fuente:** Autor

**Grafica 10.** Bode recubrimiento C3.



**Fuente:** Autor

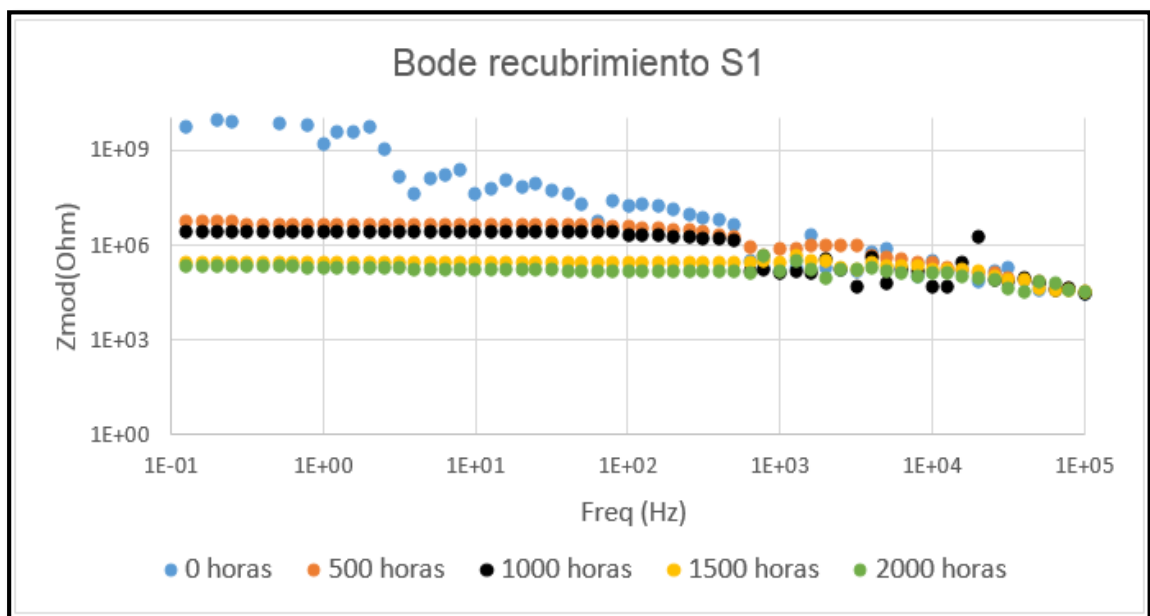
**Grafica 11.** Bode recubrimiento C4.



**Fuente:** Autor

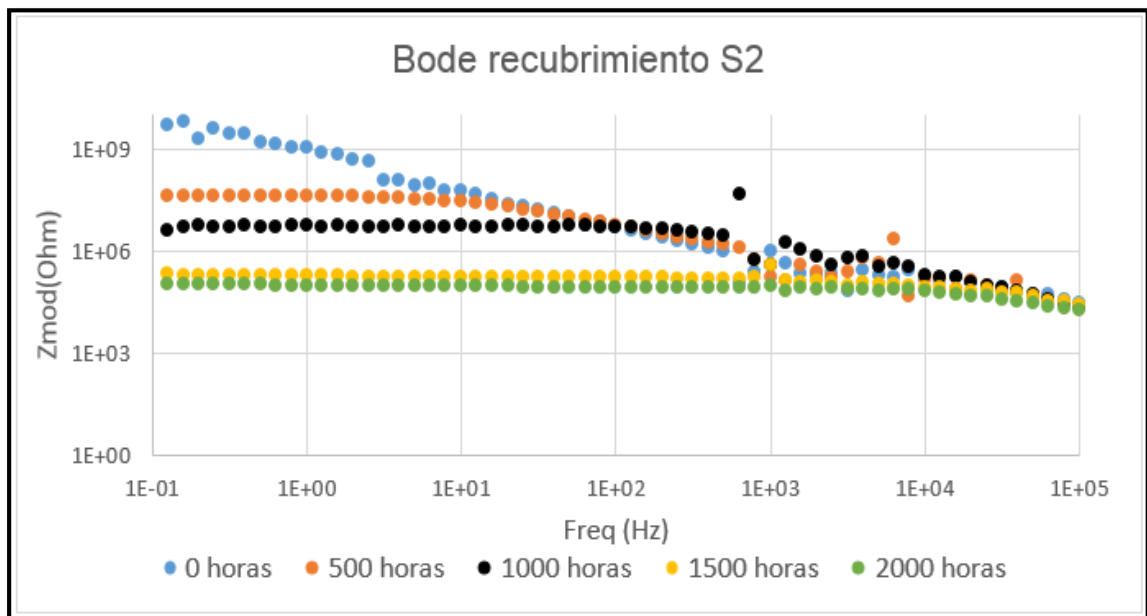
- El sistema **S**, el cual está conformado por los recubrimientos **S1**, **S2**, **S3** y **S4**, como se observa en la gráfica de bode los recubrimientos presentan un comportamiento capacitivo, antes de ser sometidos a condiciones que puedan ocasionar algún deterioro en sus propiedades. Las primeras 500 horas de la prueba los recubrimientos sufren una caída óhmica considerable, como se evidencia en el transcurso de las pruebas los recubrimientos presentan un comportamiento resistivo., y su resistencia al poro no presentan cambios drásticos en su impedancia, como se muestra en las gráficas (12, 13,14 y 15).

**Gráfica 12.** Bode recubrimientos S1.



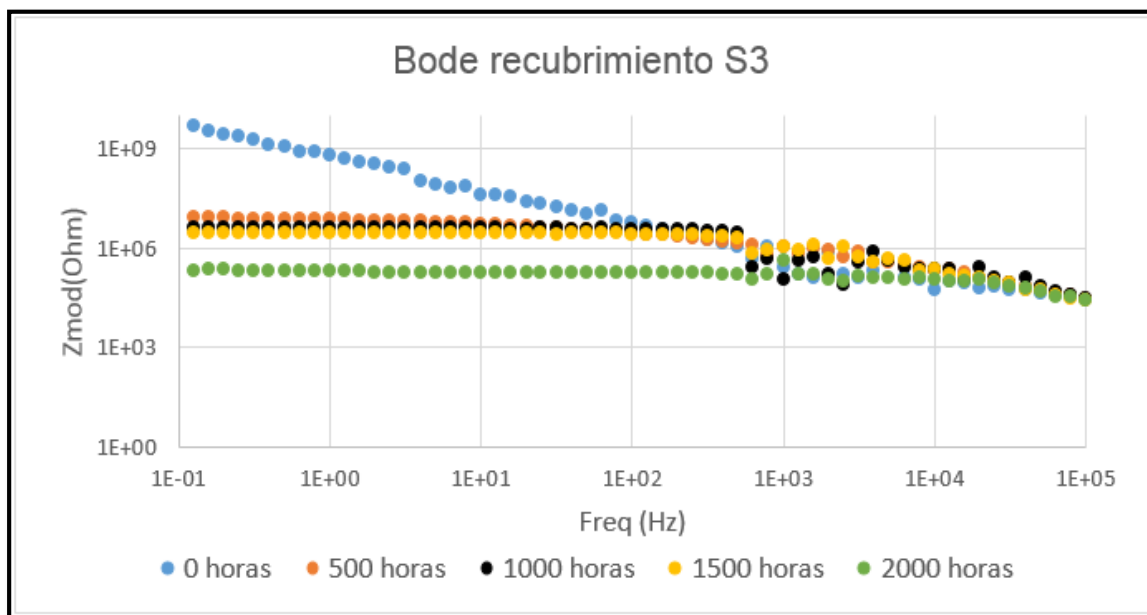
**Fuente:** Autor

**Grafica 13.** Bode recubrimiento S2.



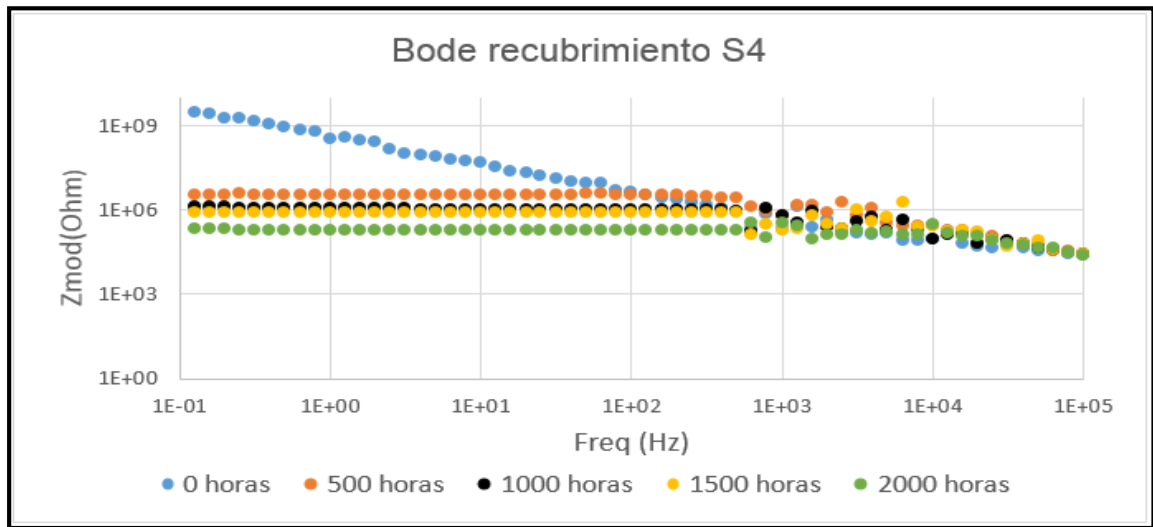
**Fuente:** Autor

**Grafica 14.** Bode recubrimiento S3.



**Fuente:** Autor

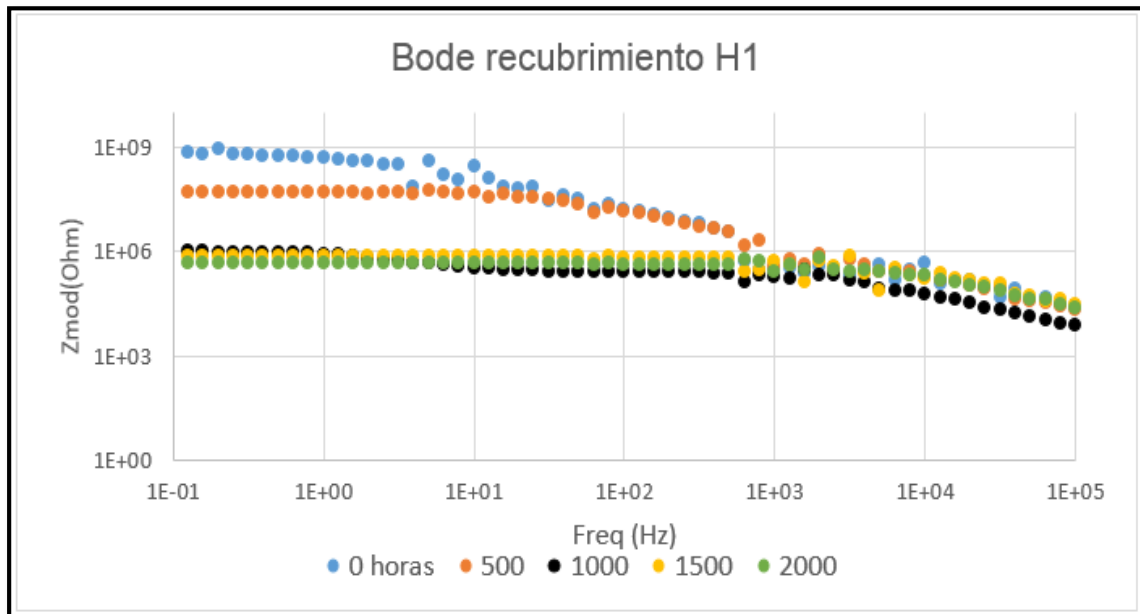
**Grafica 15.** Bode recubrimiento S4.



**Fuente:** Autor

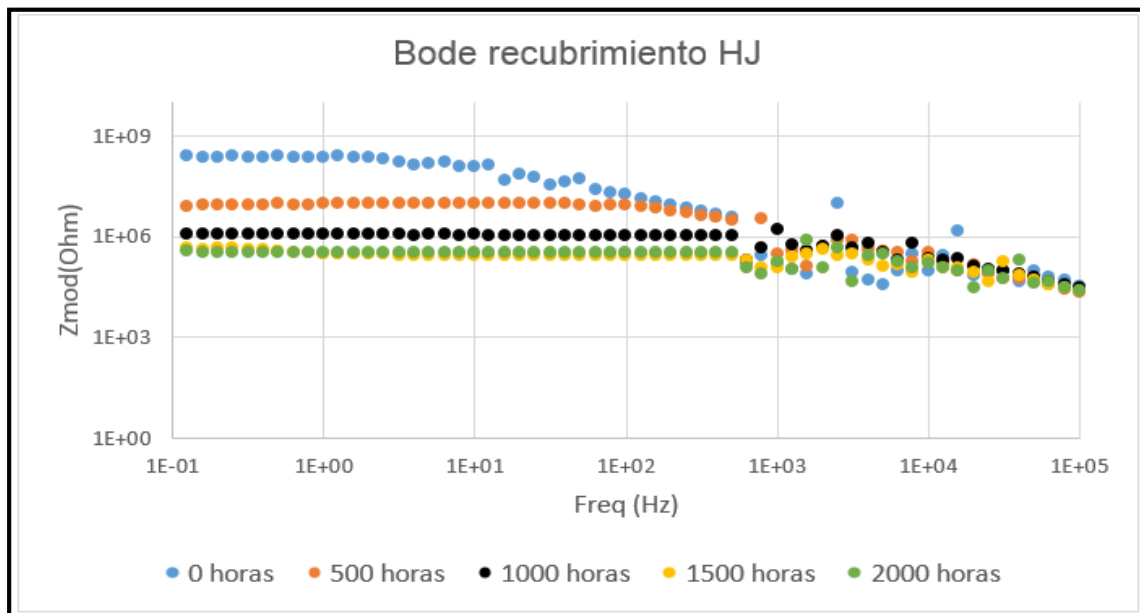
Para el caso del sistema **H**, con los recubrimientos **H1**, **HJ** y **H3**, antes de ingresar a la cámara de niebla salina el parámetro de impedancia muestran un comportamiento capacitivo. Junto con este comportamiento, algunos procesos electroquímicos ya pueden estar sucediendo bajo el recubrimiento a lo largo de la interfaz recubrimiento / metal, que está influenciada por los métodos de preparación de la superficie, sin embargo para el recubrimiento **H4** no presenta este mismo comportamiento ya que desde las 0 horas de prueba el recubrimiento tiene un parámetro de impedancia resistivo, como se muestra en la gráfica (16, 17,18 19).

**Grafica 16.** Bode recubrimiento H1.



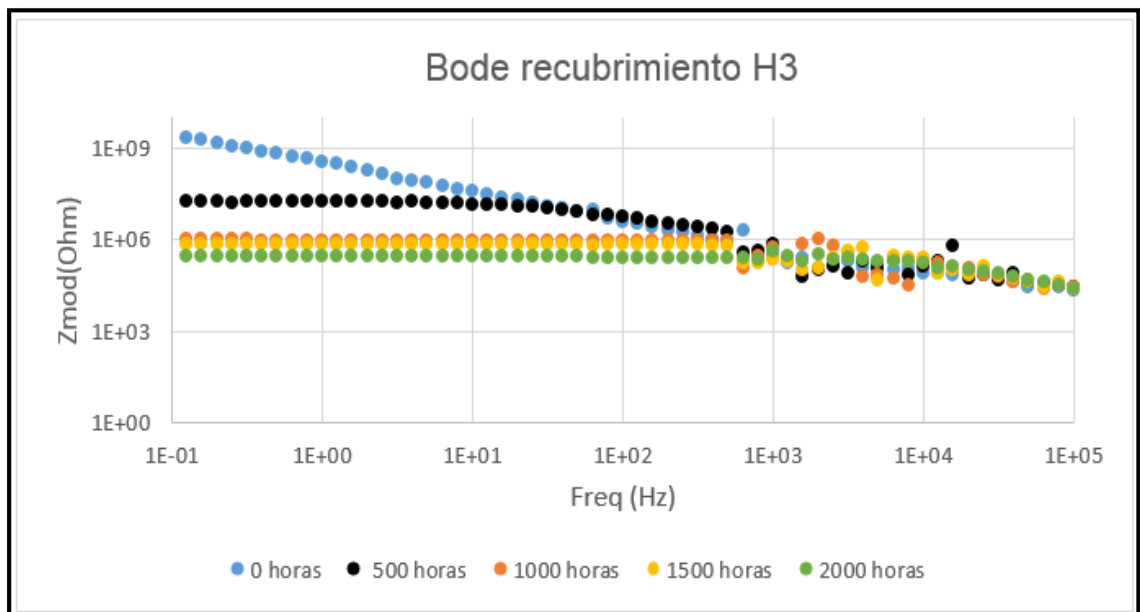
**Fuente:** Autor

**Grafica 17.** Bode recubrimiento HJ.



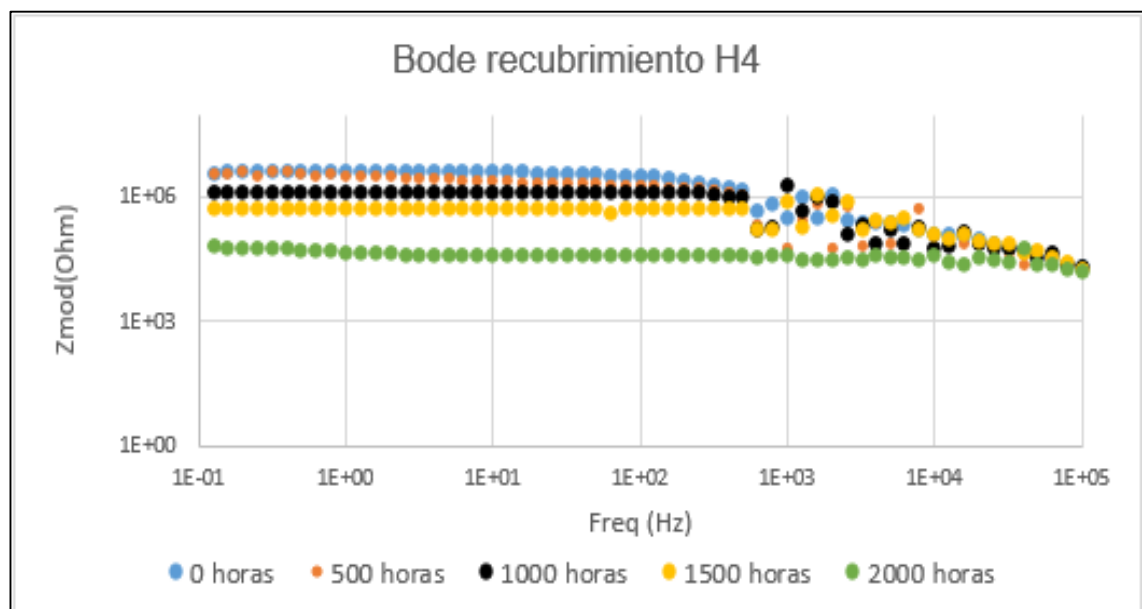
**Fuente:** Autor

**Grafica 18.** Bode recubrimiento H3.



**Fuente:** Autor

**Grafica 19.** Bode recubrimiento H4

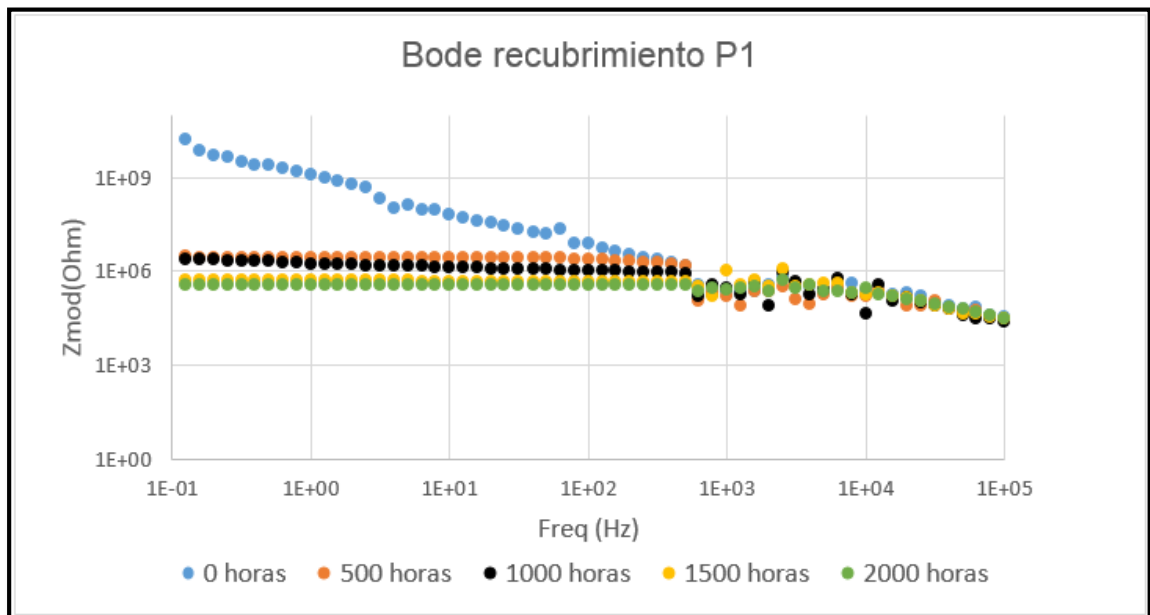


**Fuente:** Autor



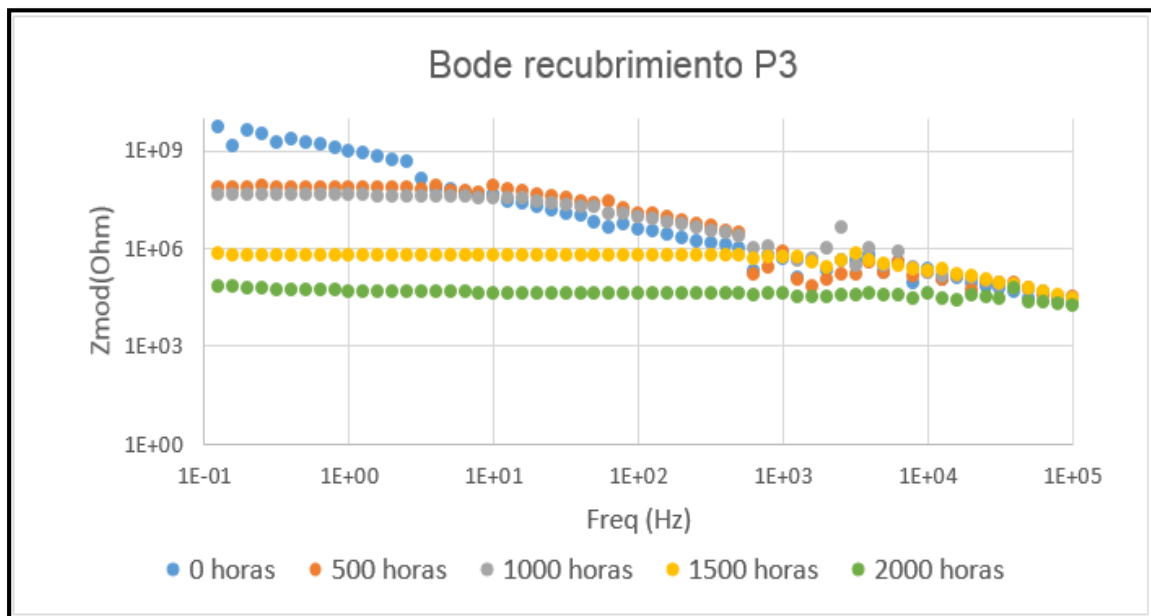
- El sistema **P**, con los recubrimientos **P1** y **P3**, muestran en la gráfica de bode un comportamiento capacitivo antes de ingresar a la cámara de niebla salina en el transcurso de la prueba los recubrimientos se estabilizan, este comportamiento es resistivo. las primeras 500 horas de la prueba, los recubrimientos sufren una caída óhmica considerable, como se muestra en la gráfica (20 y 21).  
Los recubrimientos **P2** y **P4**, presentan un comportamiento capacitivo en las primeras 500 horas de prueba, a las 1000 horas de ensayo los recubrimientos tienen una caída óhmica alta y se estabilizan dando como resultado un comportamiento resistivo, como se muestra en la gráfica (22 y 23).

**Gráfica 20.** Bode recubrimiento P1.



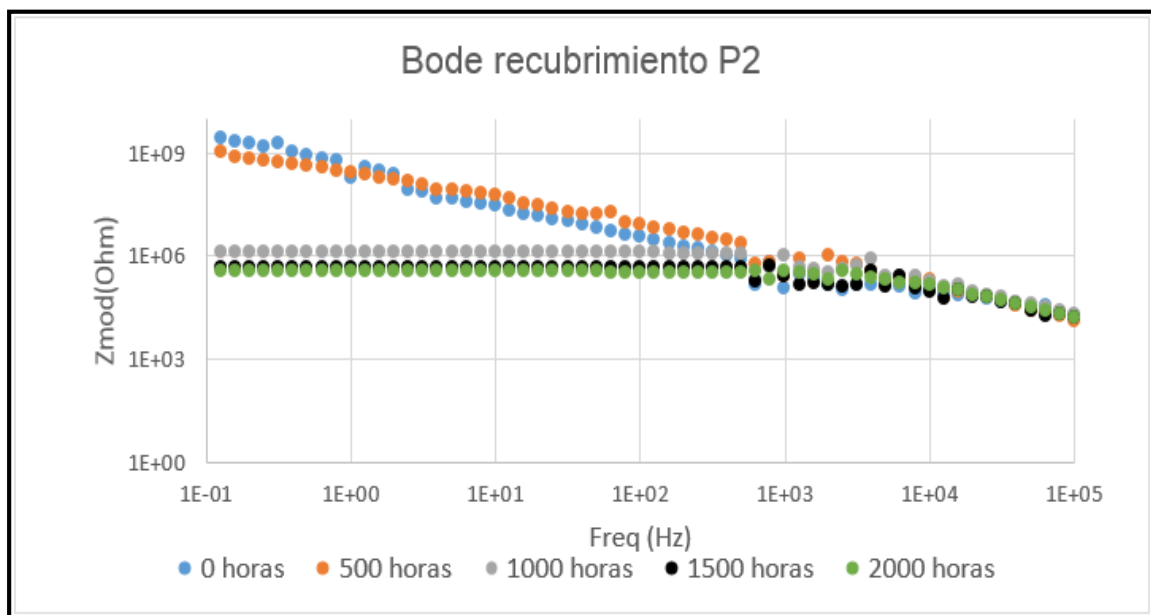
**Fuente:** Autor

**Grafica 21.** Bode recubrimiento P3.



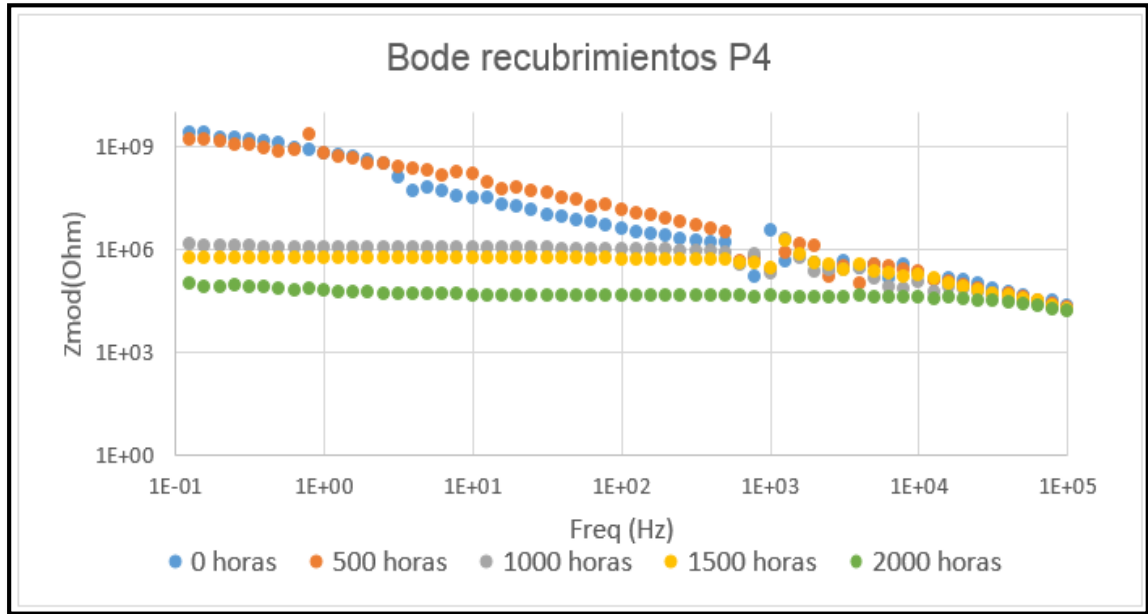
**Fuente:** Autor

**Grafica 22.** Bode recubrimiento P2.



**Fuente:** Autor

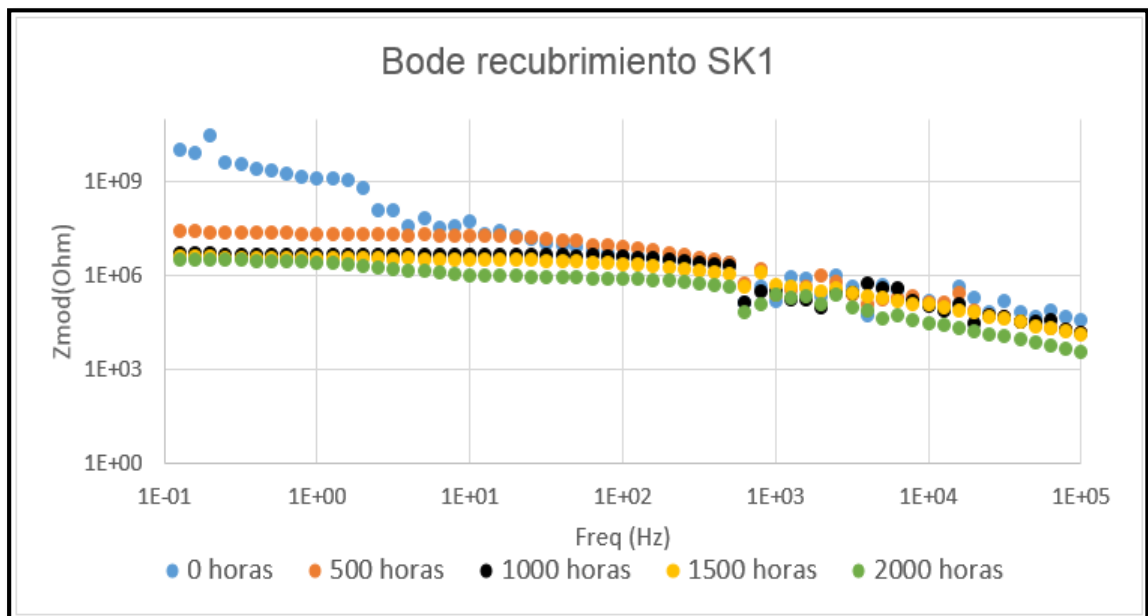
**Grafica 23.** Bode recubrimiento P4.



**Fuente:** Autor

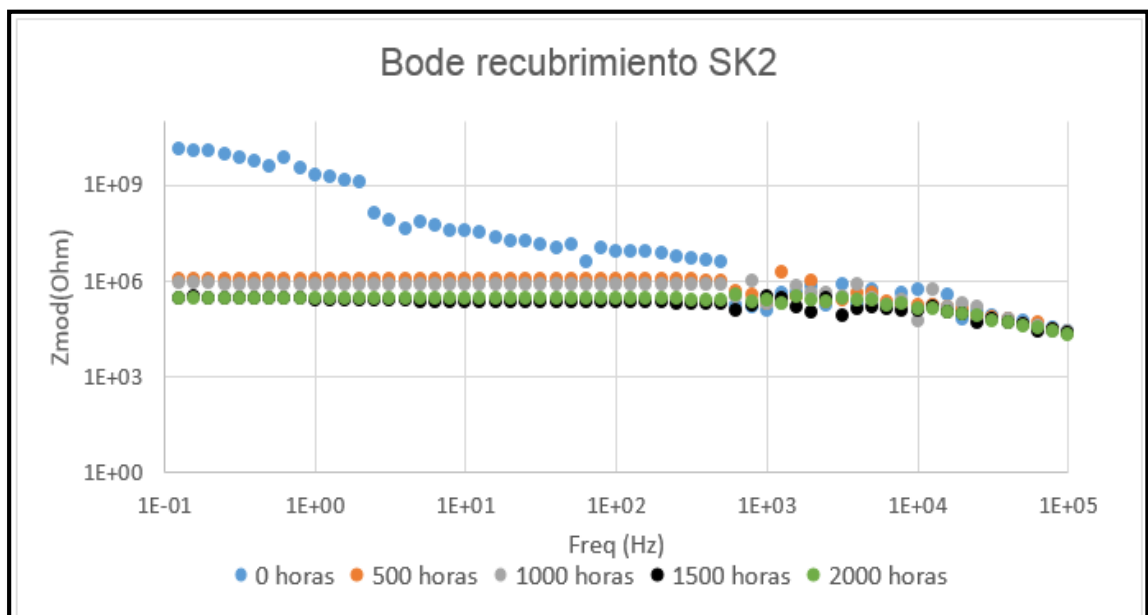
- A continuación se establece el análisis del sistema **SK**, con los recubrimientos **SK1**, **SK2**, **SK3** y **SK4**, para este caso se observa en la fase inicial un comportamiento capacitivo, el cual no ha sido expuesto a ninguna condición que pueda generar disminución en su característica protectora, observándose que el intercambio iónico presenta una alta impedancia con valores por encima de las giga ohmios, estableciendo el recubrimiento con excelentes propiedades de impedir el contacto entre el electrolito y el sustrato. El recubrimiento **SK1** ver (figura 24), presenta mejor comportamiento en relación con los demás sistemas evaluados debido a que su caída óhmica tiene una leve disminución, manteniéndose cerca del rango de la giga ohmios. Para el casos de los demás recubrimientos (**SK2**, **SK3** y **SK4**), presenta a 0 horas un comportamiento capacitivo, sin embargo al estar expuesto en atmosferas de alto contenido de cloruros su condición disminuye a valores de mega ohmios, estableciendo una caída en la protección del sustrato, sin embargo no llega a valores que puedan ocasionar deterioro acelerado ver (figura 25, 26 y 27).

**Grafica 24.** Bode recubrimiento SK1.



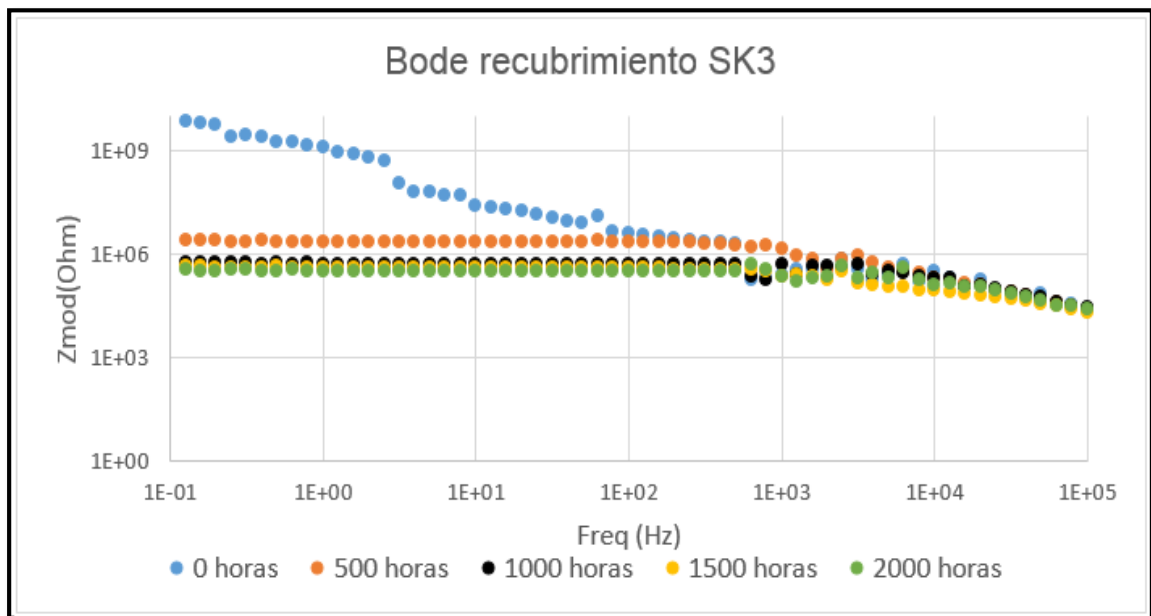
**Fuente:** Autor

**Grafica 25.** Bode recubrimiento SK2.



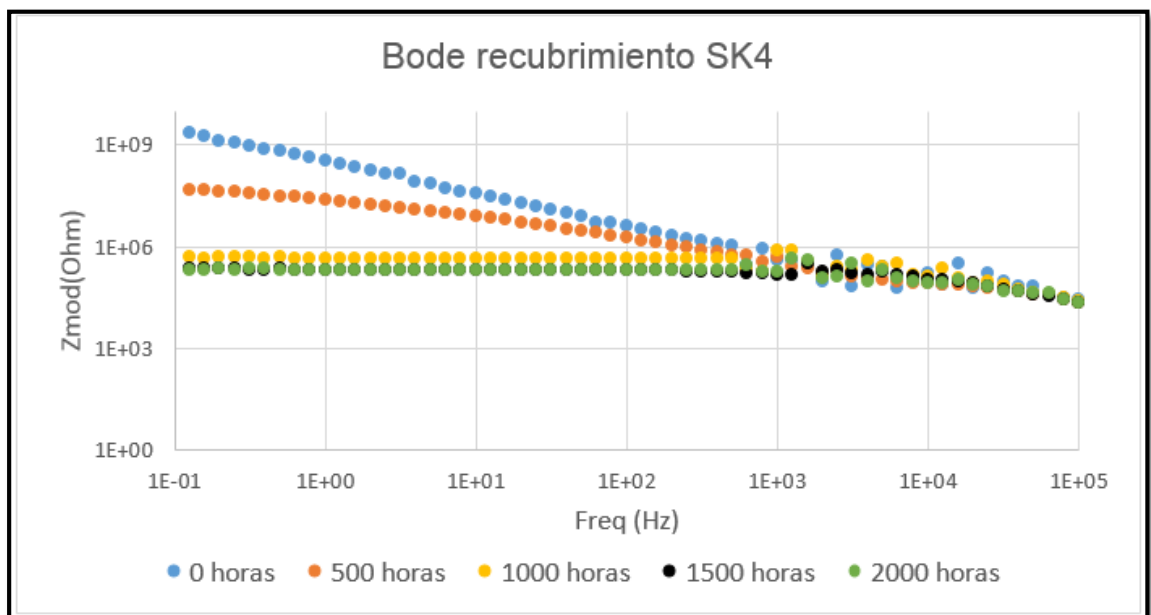
**Fuente:** Autor

**Grafica 26.** Bode recubrimiento SK3.



**Fuente:** Autor

**Grafica 27.** Bode recubrimiento SK4.

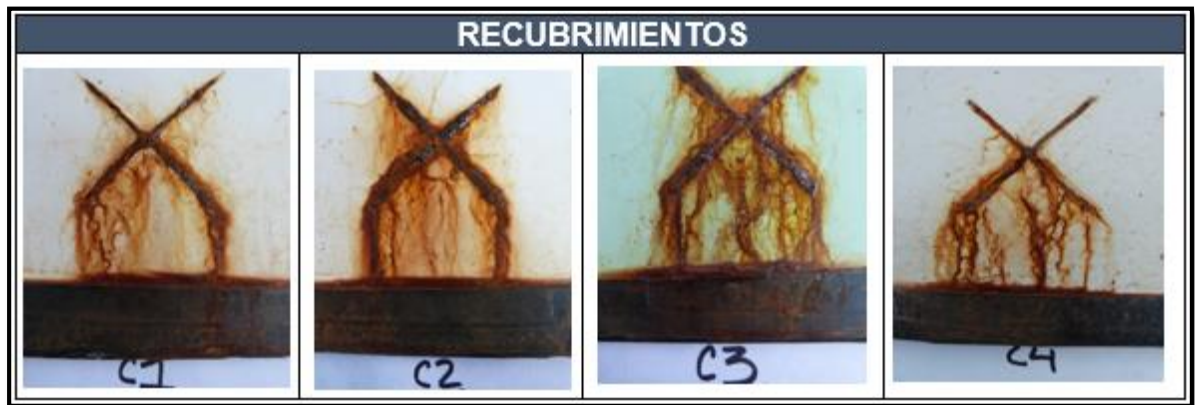


**Fuente:** Autor

**3.3.6. Corrosión en la incisión.** En cuanto a los recubrimientos todos los sistemas presentan corrosión en la incisión, esto se debe a que el recubrimiento no contiene altos contenidos de zinc o de elementos anódicos que puedan auto proteger la parte descubierta.

- Sistema de recubrimientos **C**, presenta corrosión en la incisión, se deduce que los recubrimientos no contienen elementos anódicos como se muestra en la (figura 56).

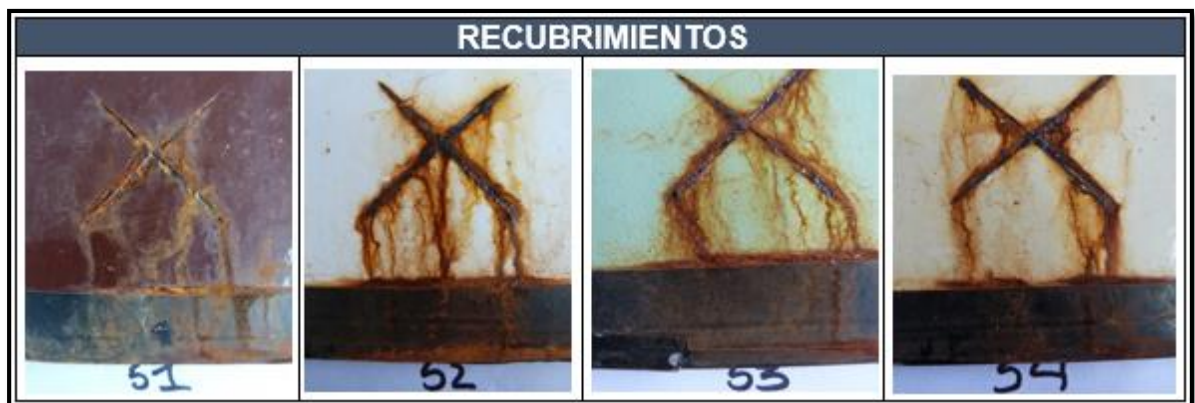
**Figura 56.** Incisiones en el sistema C.



**Fuente:** Autor

- Sistema de recubrimientos **S**, presenta corrosión en la incisión, se deduce que los recubrimientos no contienen elementos anódicos como se muestra en la (figura 57).

**Figura 57.** Incisiones en el sistema S.



**Fuente:** Autor

- Sistema de recubrimientos **H**, presenta corrosión en la incisión, se deduce que los recubrimientos no contienen elementos anódicos como se muestra en la (figura 58).

**Figura 58.** Incisiones en el sistema H.



**Fuente:** Autor

- Sistema de recubrimientos **P**, presenta corrosión en la incisión, se deduce que los recubrimientos no contienen elementos anódicos como se muestra en la (figura 59).

**Figura 59.** Incisiones en el sistema P.



**Fuente:** Autor

- Sistema de recubrimientos **SK**, presenta corrosión en la incisión, se deduce que los recubrimientos no contienen elementos anódicos como se muestra en la (figura 60).



**Figura 60.** Incisiones en el sistema SK.



**Fuente:** Autor

**3.3.7 Correlación de datos de cathodic disbonding (desprendimiento catódico) y espectroscopia de impedancia electroquímica.** En el transcurso de las pruebas se puede observar que los recubrimientos que presentan mejor comportamiento en la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica, tienen un alto tiempo de ampollamiento o no ampollaron en el transcurso de la prueba de cathodic disbonding como se muestra en la (tabla 3).

**Tabla 3.** Relación de datos de espectroscopia de impedancia electroquímica vs cathodic disbonding.

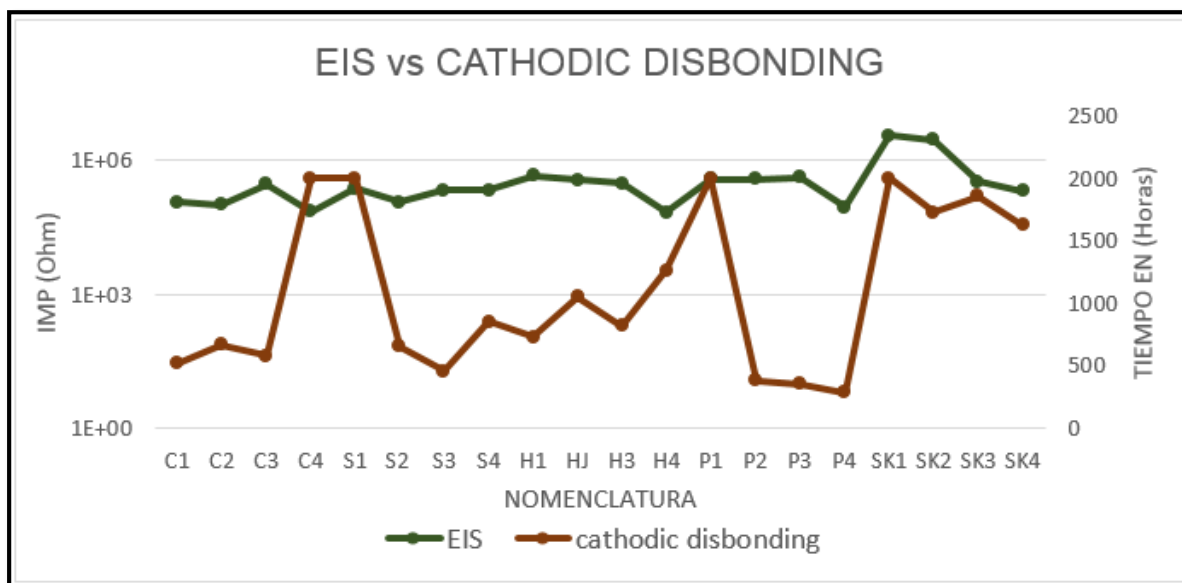
Nomenclatura	Imp (ohm) 2000 horas	Tiempo (hrs)	Nomenclatura	Imp (ohm) 2000 horas	Tiempo (hrs)
<b>C1</b>	1,14E+05	520	<b>H3</b>	3,05E+05	816
<b>C2</b>	9,92E+04	670	<b>H4</b>	6,86E+04	1264
<b>C3</b>	2,88E+05	578	<b>P1</b>	3,76E+05	2000
<b>C4</b>	7,23E+04	2000	<b>P2</b>	3,86E+05	378
<b>S1</b>	2,29E+05	2000	<b>P3</b>	4,06E+05	356
<b>S2</b>	1,17E+05	656	<b>P4</b>	9,02E+04	286
<b>S3</b>	2,12E+05	456	<b>SK1</b>	3,56E+06	2000
<b>S4</b>	2,18E+05	850	<b>SK2</b>	2,82E+06	1725
<b>H1</b>	4,55E+05	726	<b>SK3</b>	3,31E+05	1854
<b>HJ</b>	3,56E+05	1052	<b>SK4</b>	2,04E+05	1625

**Fuente:** Autor



En la (gráfica 28), se puede evidenciar el comportamiento de las técnicas de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y cathodic disbonding (desprendimiento catódico), concluyendo que el sistema de recubrimientos que obtuvo un parámetro de impedancia alto, posee un tiempo de ampollamiento superior en la prueba de cathodic disbonding, de esta forma se pudo seleccionar el recubrimiento más idóneo el cual cumple con las características protectoras más altas. Por lo antes mencionado al utilizar espectroscopia de impedancia electroquímica y cathodic disbonding se puede predecir la vida útil de los recubrimientos, para evitar pérdidas económicas a futuro en las empresas.

**Grafica 28.** Comportamiento de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica vs cathodic disbonding.



**Fuente:** Autor

Como ya se dijo anteriormente, para evitar de alguna manera la corrosión de las estructuras metálicas, se usan sistemas duales de protección (recubrimiento / protección catódica). Si no se hace manejo adecuado puede afectar de manera considerable la eficiencia del recubrimiento. Por lo tanto, podemos determinar que la preparación de la superficie y una aplicación en condiciones no adecuadas inducen un comportamiento deficiente de los recubrimientos.

El recubrimiento a las 2000 horas de ser expuestas en cámara de niebla salina muestra un comportamiento resistivo, durante el mismo periodo que fueron sometidos los recubrimientos a protección catódica, se evidencia que en gran parte de estos generaron algún tipo de ampollamiento los cuales tenían una impedancia

relativamente baja, absorbiendo más agua e iones del electrolito dañándose permanentemente y permitiendo una transferencia de carga mayor. Se atribuye posiblemente a la preparación de la superficie del sustrato debido a la presencia de impurezas en el método de limpieza. En este caso particular, la adhesión entre el recubrimiento y el sustrato se disminuyó permitiendo que la presión ejercida por el  $H_2$  (gaseoso) producto de la reacciones de reducción formen ampollas provocando una pérdida de las propiedades de adhesión del recubrimiento, lo que aumenta el número de vías conductoras a través de este.

## 4. CONCLUSIONES

En general se observa que:

- El sistema (**SK**) muestra un buen desempeño aun estando expuesto a diferentes ambientes que pueden causar deterioro de la película y generación de procesos farádicos. Mantiene una buena barrera dieléctrica en un rango de Mega Ohmios ( $10^6$ ), después de ser expuesto en condiciones aceleradas de corrosión. Esto concluye la compatibilidad que tiene frente a la combinación de mecanismo de protección catódica y la aplicación de recubrimientos.
- Se observa que el sistema (**H**), mantiene valores de impedancia cercanos a rangos de los Mega-Ohmios ( $10^6$ ), el cual puede permitir contacto entre el sustrato y el fluido si este llega ser muy agresivo. Para el caso de los sistemas (**C** y **P**), presentan recubrimientos que están por el orden del kilo-ohmio terminado la prueba, permitiendo que la característica protectora sea mínima.
- En la industria se encuentran varios ambientes, los recubrimientos que ampollaron en la prueba de cathodic disbonding (desprendimiento catódico) pueda que presenten un comportamiento más idóneo en tubería aérea, tubería enterrada (segundo método de protección sea con ánodos de sacrificio).
- Los recubrimientos que presentan ampollamiento, la causa no solo sea la sobreprotección catódica, un factor muy importante que juega en este caso es la técnica de aplicación y la preparación superficial del sustrato.
- Se concluye de la prueba de cathodic disbonding (desprendimiento catódico) el sistema que no presenta mayor afectación por sobre protección catódica es el (**SK**), ya que algunos de los recubrimientos evaluados de este sistema no presentan cambios en su tono de color y brillo.
- Se determina que recubrimientos del sistema (**P**), presenta más deterioro en la prueba de cathodic disbonding (desprendimiento catódico), por lo cual se concluye que el recubrimiento no es apto para tubería enterrada.
- La espectroscopia de impedancia electroquímica, acompañada de chequeos visuales, puede ser una excelente herramienta para monitorear el desempeño de recubrimientos. Ya que esta técnica ayuda a tener más claridad de los

fenómenos físico-químicos que puedan estar ocurriendo en la interface metal-recubrimientos.

- La selección de recubrimientos como protección frente al fenómeno de corrosión es muy importante para la construcción de tubería enterrada, por tanto no todos son aptos para este fin. La combinación de las técnicas cathodic disbonding (desprendimiento catódico) y cámara de niebla salina son de gran utilidad al momento de seleccionar el recubrimiento más idóneo para que en un futuro no ocasionar pérdidas en la industria.
- Las técnicas de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y cathodic disbonding (desprendimiento catódico), en correlación a los resultados obtenidos, se puede concluir que el sistema de recubrimiento que obtuvo un parámetro de impedancia alto, presenta un tiempo de ampollamiento superior en la prueba de cathodic disbonding. Se pudo seleccionar el recubrimiento más idóneo el cual cumple con las características protectoras más altas, de esta forma proveer un conocimiento más exacto del medio en el que se pueda utilizar los recubrimientos.
- En el transcurso del desarrollo experimental de las dos técnicas, se observó que no se pudo correlacionar exitosamente, ya que son muchos los parámetros que interfieren el comportamiento de los recubrimientos. Sin embargo, se dejan la puertas abiertas a nuevas investigaciones sobre los temas de cathodic disbonding y espectroscopia de impedancia electroquímica.

## 5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la aplicación de protección catódica en un potencial que se encuentre por debajo de -1.5 V, para evitar las fallas que se presentaron en este ensayo debido al exceso de potencial.
- Hacer una buena preparación de la superficie metálica, ya que mientras esta se realice de la mejor manera, mayor resistencia al desprendimiento catódico habrá en la tubería.
- Debido a que algunos recubrimientos fueron aplicados por brocha, se recomienda aplicación por técnica de aspersión, para lograr una mayor homogeneidad en la superficie.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- ASTM B-117 “Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus”, ASTM International, 1997.
- ASTM G-3 “Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing”, ASTM International, 1999.
- ASTM G-8 “Standard Test Methods for Cathodic Disbonding of Pipeline Coatings”, ASTM International, 2010.
- NACE Standard, (1999). “Standard Recommended Practice RP-090-90: Cathodic Protection of Reinforcing steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures”. National Association of Corrosion engineers, Houston, Texas, USA
- Suárez-Corrales Xenia Isabel, Villar-López René Valentino, Corvo-Pérez Francisco Eduardo. Resistencia al clima tropical de aceros galvanizados con y sin recubrimiento. Ingeniería, Investigación y Tecnología. Enero-Marzo 2014. P 29-40
- Navarrete Valles, Luis. Estudio del desprendimiento catódico de recubrimientos orgánicos aplicados en superficies de acero. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería 2008.
- M.K. Harun, J. Marsh, S.B. Lyon. The effect of surface modification on the cathodic disbondment rate of epoxy and alkyd coatings. Faculty of Applied Sciences, MARA University of Technology, Malaysia. Corrosion & Protection Centre, School of Materials, University of Manchester, UK
- J. Winiarski, W. Tylus. EIS and XPS investigations on the corrosion mechanism of ternary Zn–Co–Mo alloy coatings in NaCl solution. Department of Advanced Material Technologies, Faculty of Chemistry, Wrocław University of Technology, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, PL-50370 Wrocław, Poland.
- Andrés Alberto Guzmán Rosas. “Evaluación De La Resistencia A La Corrosión De Sistemas De Recubrimientos Con Altos Sólidos Por Medio De Espectroscopia De Impedancia Electroquímica” Tesis Maestría En Ingeniería – Ingeniería Química. Escuela De Procesos Y Energía. Facultad De Minas, Universidad Nacional De Colombia. Medellín 2011.
- Edward Restrepo, Mónica Monsalve, Andrés Gonzalez, Fabio Vargas, Guillermo Latorre, Esperanza López. Influencia de los esfuerzos residuales en la

adherencia de recubrimientos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-40% TiO<sub>2</sub> depositados mediante proyección térmica por combustión. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Noviembre –Diciembre, 2016. P 219-227

- Bedoya-Lora Franky, Calderón-Gutiérrez Jorge, Bermúdez-Castañeda Ángela, Castaño-González Juan, Echeverría-Echeverría Félix, Maya-Montoya Juan. Análisis de los factores de mayor influencia en la evaluación del desempeño de recubrimientos orgánicos mediante ensayos acelerados y espectroscopia de impedancia electroquímica. Grupo de Corrosión y Protección de la Universidad de Antioquia e ISA, Medellín, Colombia
- Laverde Laverde Víctor Hugo, Ing. John Jairo Olaya. Diseño y fabricación de una cámara salina para realizar análisis de corrosión en materiales. Universidad nacional de Colombia. 2011.
- E. Calvo, y J. I. Ochoa, Carlos Córdoba Arias. Diseño y construcción de una cámara de niebla salina para ensayos de corrosión. Universidad Tecnológica de Pereira.2007.
- Linda Gil de Fuentes. Corrosión en la industria del petróleo y el uso de tecnologías de recubrimientos como alternativa de protección. Centro de Estudios de Corrosión. Universidad Nacional Experimental Politécnica. Venezuela
- Rendon Gregorio jose. PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN EN TUBERÍAS. Ingeniería Continental, S.A (ICONSA). Panamá.
- Dr. Ricardo Orozco Cruz. Recubrimientos anticorrosivos. Universidad Veracruzana. Ingeniería química.
- Saavedra Cornejo, Walter Enrique. “Optimización del Sistema de Protección Catódica en le Oleoducto Nor-Peruano”. Tesis (Titulado en Ingeniería Industrial). Piura: Universidad de Piura, 1988. P 25
- Pemex CID-NOR-N-SI-0001. “Requisitos mínimos de seguridad para el diseño, construcción, operación, mantenimiento e inspección de ductos de transporte”. 14-Agosto-1998. P 229
- Pemex PROY-NRF-047-PEMEX-2002. “Diseño, instalación y mantenimiento para los sistemas de protección catódica”. P 11
- YAN Maocheng, XU Jin, YU Libao, WU Tangqing, SUN Cheng, KE Wei. EIS analysis on stress corrosion initiation of pipeline steel under disbanded coating

in near-neutral pH simulated soil electrolyte. Corrosion Science. September 2016. P 23-34

- Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. “Más allá de la Herrumbre II: La lucha contra la corrosión”. 1989, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 79. México.
- Pemex NRF-026 PEMEX-2001. “Protección con recubrimientos anticorrosivos para tuberías enterradas y/o sumergidas”. P 12-13.
- Córdoba Arias Carlos, Calvo Henao Erwin, Ochoa Jaramillo José. Diseño y construcción de una cámara de niebla salina para ensayos de corrosión. Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de ingeniería mecánica. Abril 2007
- Mendoza Juan, Flores Rubén, Romero Durán, Genescá Llongueras Joan. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica en corrosión. Facultad de química, Instituto Mexicano Del Petróleo.
- J.L. Luo, C.J. Lin, Q. Yang, S.W. Guan. Cathodic disbonding of a thick polyurethane coating from steel in sodium chloride solution. Progress in Organic Coatings. June 1997. P 289–295
- G. Ahmed, A. Nishikata, T. Tsuru. Electrochemical Corrosion Monitoring of Galvanized Steel Under Cycle Wet-Dry Condition. Corrosion Science, 42 (2000). P 112–120
- M. Morcillo, E. Almeida, F. Fragata, Z. Panossian. Corrosión y protección de metales en las atmósferas de Iberoamérica. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología (CYTED), Madrid, España, Editorial Gráficas Salué (2002), pp. 203–232 SA
- R.M. Vera. Comportamiento frente a la corrosión en ambiente marino de acero galvanizado y acero galvanizado pintado (Duplex). Información Tecnológica. Materiales y Metalurgia, 16 (4) (2005). P 53–58
- X.G. Li, D.W. Zhang, Z.Y. Liu, Z. Li, C.W. Du, C.F. Dong. Materials science: share corrosion data. Nature, 527 (2015). P 441
- A. Nishikata, Y. Ichihara, T. Tsuru. V Electrochemical impedance spectroscopy of metals covered with a thin electrolyte layer. Electrochim. Acta, 41 (1996). P 1057–1062



- M.C. Yan, J.Q. Wang, E.H. Han, W. Ke. Electrochemical measurements using combination microelectrode in crevice simulating disbonded of pipeline coatings under cathodic protection. *Corros. Eng. Sci. Technol.*, 42 (2007). P. 42–49
- M.C. Yan, J.Q. Wang, E.H. Han, W. Ke. Local environment under simulated disbonded coating. on steel pipelines in soil solution. *Corros. Sci.*, 50 (2008), pp. 1331–1339
- C.N. Cao. Principles of Electrochemistry of Corrosion. Chemical Industry Press, Beijing (2008)
- X.W. Guo, J.W. Chang, S.M. He, *et al.* Investigation of corrosion behaviors of Mg–6Gd–3Y–0.4Zr alloy in NaCl aqueous solutions. *Electrochimica Acta*, 52 (7) (2007). P 2570–2579
- B. Ramezanzadeh, S. Niroumandrad, A. Ahmadi, *et al.* Enhancement of barrier and corrosion protection performance of an epoxy coating through wet transfer of amino functionalized grapheme oxide. *Corrosion Sci.*, 103 (2016). P 283–304
- W. Funke, in M. Kendig and H. Leidheiser (eds.), *Corrosion Protection by Organic Coating*, The Electrochemical Society, 1987. P 1
- J.D. Kellner, in M. Kendig and H. Leidheiser (eds.), *Corrosion Protection by Organic Coating*, The Electrochemical Society, 1987. P 48.
- Huichao Bi, John Sykes. An investigation of cathodic oxygen reduction beneath an intact organic coating on mild steel and its relevance to cathodic disbonding. *Progress in Organic Coatings*. October 2015, Pages 83–87
- H. Bi, J.M. Sykes. Cathodic disbonding of an unpigmented epoxy coating on mild steel under semi- and full-immersion conditions. *Corros. Sci.*, 53 (2011). P 3416–3425